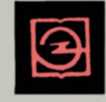




И. С. ТОЛМАССКИЙ

Высокочастотные магнитные материалы

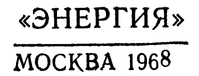


МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

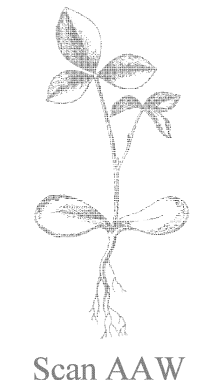
Выпуск 651

И. С. ТОЛМАССКИЙ

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ


«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1968





6Ф2.13
Т52
УДК 621.318.1.023

Толмасский И. С.

Т52 Высокочастотные магнитные материалы. М., «Энергия», 1968.

72 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 651)

Излагаются электромагнитные свойства высокочастотных магнитодиэлектриков и ферритов, рассматриваются методы изготовления высокочастотных сердечников и приводятся их параметры. Даются рекомендации по рациональному выбору магнитных материалов и оптимальному применению сердечников. Излагаются методы измерения электромагнитных параметров высокочастотных материалов и сердечников на их основе в диапазоне частот от 10 *кгц* до 100 *Мгц*. Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

3-4-5
338-67

6Ф2.13

Толмасский Иосиф Семенович

Высокочастотные магнитные материалы

Редактор *Л. Г. Фунштейн*

Техн. редактор *В. В. Зеркаленкова*

Корректор *А. Д. Халанская*

Сдано в набор 19/XII 1966 г. Подписано к печати 22/VI 1967 г. Т-07001
Формат 84×108 1/32. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 3,78. Уч.-изд. л. 4,72
Тираж 70.000 экз. Цена 19 коп. Зак. 1624

Издательство «Энергия». Москва Ж-114,
Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР

Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВЫ МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Ферромагнетизм и ферримагнетизм

Большинство наблюдаемых магнитных явлений вызвано изменениями электрического поля в результате движения электрических зарядов.

Электроны атомов, движущиеся по орбитам, могут рассматриваться как носители элементарного тока I, создающего магнитное поле и орбитальный магнитный момент $M_о$ (рис. 1, *а*). Однако роль орбитальных моментов чрезвычайно мала в явлениях намагничивания. Основными элементарными носителями магнетизма служат спиновые магнитные моменты $M_с$, образующиеся в результате вращения электрона вокруг собственной оси (рис. 1, *б*).

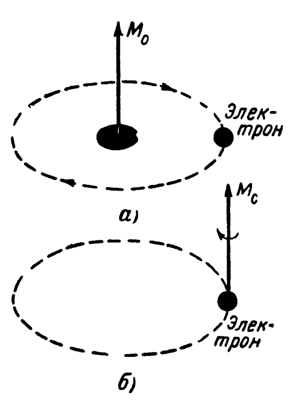


Рис. 1. Орбитальный (*а*) и спиновой (*б*) магнитные моменты электрона.

Таким образом, каждый атом любого вещества обладает орбитальным и спиновым магнитными моментами, которые при внесении вещества во внешнее магнитное поле вступают с ним во взаимодействие. Возникающий при этом дополнительный момент действует против направления поля. Это явление, называемое *диамагнетизмом* и характерное для всех веществ, проявляется в том, что диамагнетики выталкиваются из неоднородного магнитного поля. Эффект диамагнетизма очень незначителен и заметен только в тех веществах, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов.

Диамагнетизм проявляется у большинства веществ, но для тех веществ, в которых суммарный магнитный момент атомов не равен нулю, на диамагнетизм накладывается преобладающий по величине некомпенсированный момент электронов и возникает эффект *парамагнетизма.*

При воздействии на парамагнетик внешнего поля создается преимущественное направление расположения элементарных магнит-

ных моментов и тело оказывается намагниченным. В отсутствие поля суммарный магнитный момент в парамагнетике равен нулю, так как под действием теплового движения молекул магнитные моменты располагаются статически равновероятно в любом направлении.

Большинство парамагнетиков очень слабо намагничивается даже в сильных полях, но имеется небольшая группа веществ — *ферромагнетиков,* которые характеризуются способностью интенсивно намагничиваться. К ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт, гадолиний и некоторые сплавы.

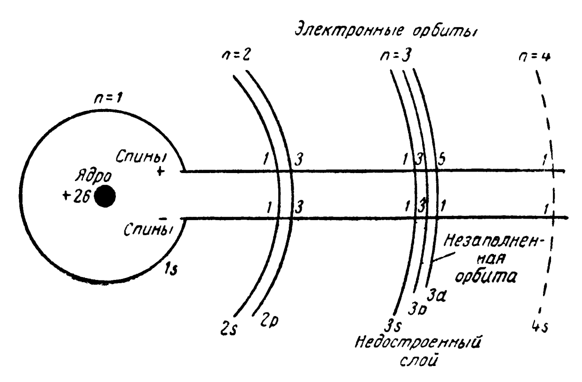


Рис. 2. Строение атома железа.

Всем ферромагнетикам свойственно кристаллическое строение; их магнитные свойства существенно зависят от напряженности поля, температуры и предшествующего магнитного состояния (гистерезиса). Существует температура, выше которой ферромагнетики теряют магнитные свойства (точка Кюри).

Детальный анализ атомарной структуры всех элементов, приведенных в таблице Д. И. Менделеева, показывает, что ферромагнетизм наблюдается в переходных элементах, у которых не все внутренние оболочки полностью заполнены электронами. Такое состояние атомов приводит к образованию некомпенсированных спиновых магнитных моментов в недостроенном слое. В этом можно убедиться на примере строения атома железа (рис. 2). На всех орбитах, кроме незаполненной в недостроенном слое, спины электронов компенсированы, т. е. число положительных и отрицательных спинов одинаково. Эти орбиты обладают нулевым результирующим магнитным моментом. В недостроенном слое положительных спинов девять, а отрицательных пять. Оболочка 3*d* несет на себе пять положительных и один отрицательный спин. Таким образом, появляются некомпенсированные спины и результирующий магнитный момент отличается от нуля.

Для ферромагнетизма наличие некомпенсированных спинов является необходимым условием, но недостаточным, так как дезориентирующее тепловое движение требует для намагничивания до насыщения чрезвычайно больших полей.

Второе условие определяется величиной электрических сил обменного взаимодействия между электронами. Если расстояние меж-

ду атомами велико, силы обменного взаимодействия стремятся к нулю. С уменьшением расстояния эти силы растут и под их влиянием спины электронов устанавливаются параллельно. Спины образуют намагниченные до насыщения микрообласти, называемые *доменами* или областями самопроизвольного (спонтанного) намагничивания. Изучение доменной структуры ферромагнетиков показало, что линейные размеры областей спонтанного намагничивания колеблются в пределах 10^{-4} — 10^{-1} *мм* и величина их магнитного момента в 10^{15} раз больше величины магнитного момента отдельного атома.

В ферромагнетике домены, образуя замкнутую цепь, располагаются таким образом, что их результирующий момент равен нулю. Между границами доменов образуются переходные слои, внутри которых происходит непрерывный поворот магнитных моментов (рис. 3). Толщина переходного слоя для железа составляет $(0{,}25 \div 0{,}35) \cdot 10^{-5}$ *см*.

Рис. 3. Переходный слой между границами доменов.

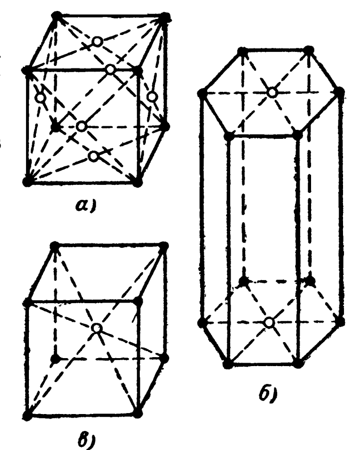


Рис. 4. Кристаллические решетки ферромагнетиков.

Если ферромагнетик поместить во внешнее магнитное поле, то под действием последнего магнитные моменты доменов начнут ориентироваться по направлению поля. Установлено, что интенсивность ориентации моментов зависит от кристаллической структуры ферромагнитных материалов, которые образуют в основном три типа решеток: кубическую гранецентрированную (рис. 4, *а*), кубическую объемноцентрированную (рис. 4, *в*) и гексагональную (рис. 4, *б*). Намагничивание кристалла в разных направлениях происходит с разной интенсивностью, которая определяется величиной сил, препятствующих повороту магнитных моментов доменов по направлению поля. Эти силы зависят от магнитного взаимодействия между атомами в решетке и определяют направления легкого и трудного намагничивания.

Для рассмотрения процесса намагничивания в соответствующем направлении пользуются обозначениями главных плоскостей кристалла. Например, для куба (рис. 5) такими плоскостями являются грани [001], [010], [100], плоскость [110], ограниченная двумя ребрами и двумя диагоналями граней, и плоскость [111], ограниченная тремя

диагоналями граней. Цифры в квадратных скобках, характеризующие плоскость, представляют собой значения отрезков, отсекаемых данной плоскостью на осях x, y и z.

Для монокристаллов железа направлением легкого намагничивания является ребро куба [100], направлением трудного намагничивания — пространственные диагонали [111]. Направлением легкого намагничивания для монокристаллов никеля являются пространственные диагонали, а трудного намагничивания — ребро куба (рис. 6). Неоднородность ферромагнетиков по степени намагничивания характеризует их *кристаллографическую магнитную анизотропию,* определяющуюся той необходимой энергией, которую требуется затратить для изменения легкого направления намагничивания в трудное. Эта энергия, называемая энергией кристаллографической магнитной анизотропии, характеризуется константой магнитной анизотропии K, равной, например, для железа $4{,}2 \cdot 10^5$ *эрг/см*^{3}.

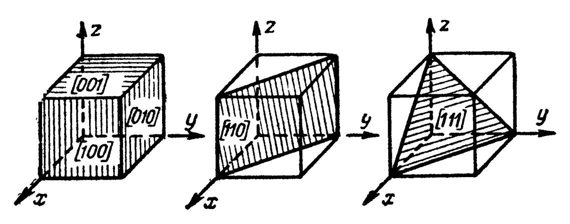


Рис. 5. Обозначения главных плоскостей кристалла.

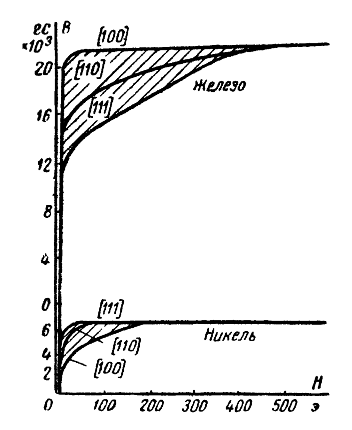


Рис. 6. Кристаллографическая магнитная анизотропия ферромагнетиков.

Как показали исследования, неоднородность магнитных свойств ферромагнетика зависит не только от кристаллографической магнитной анизотропии, но также от его химического состава, чистоты и характера примесей, температуры и условий предварительной обработки. Все эти факторы вызывают искажения кристаллической решетки, которые обусловливают магнитоупругую анизотропию и явление *магнитострикции.* Последняя связана с деформацией решетки при сжатии или растяжении ферромагнетика или при воздействии поля, вызывающего изменение направления намагничивания доменов.

Ферриты (или ферримагнетики), подвергаясь воздействию внешнего поля, намагничиваются так же, как ферромагнетики, но в отличие от последних они характеризуются рядом особенностей, обу-

словленных природой ферримагнетизма Из этих особенностей наиболее существенной является аномальная зависимость магнитных свойств ферритов от температуры. В отличие от ферромагнетиков у намагниченных до насыщения ферритов магнитные свойства при определенных значениях температуры исчезают дважды: в точке Кюри и в точке компенсации. Установлено, что это явление и ряд других, не свойственных ферромагнетикам, объясняются особенностями кристаллической структуры ферритов.

По своему составу ферриты в подавляющем большинстве являются твердыми растворами окиси железа Fe_2O_3 с окислами двухвалентных металлов. При этом различаются простые ферриты, имеющие химическую формулу $MeO \cdot Fe_2O_3$ (где Me — двухвалентный металл), и смешанные в виде твердых растворов двух или нескольких простых ферритов.

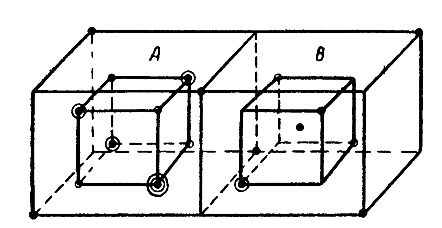


Рис. 7. Кристаллическая структура феррита.

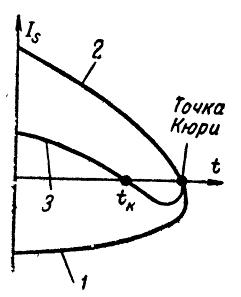


Рис. 8. Температурная зависимость намагниченности насыщения феррита.

1 — подрешетки A;
2 — подрешетки B;
3 — результирующая кривая.

Ферриты, обладающие магнитными свойствами, имеют кристаллическую структуру, аналогичную структуре природных минералов: шпинели, магнетоплумбита, граната и др. Установлено, что ферриты с магнитными свойствами состоят из подрешеток *A* и *B* с тетраэдрическим и октаэдрическим расположениями ионов, причем магнитные моменты решеток направлены антипараллельно (рис. 7). Разность между магнитными моментами подрешеток определяет намагничиваемость ферритов. Если моменты подрешеток равны, то будет иметь место *антиферромагнетизм*.

Наличие в ферритах двух подрешеток объясняет и происхождение точки компенсации при воздействии температуры на феррит, намагниченный до насыщения. Так как каждая подрешетка характеризуется своей температурной зависимостью намагниченности насыщения вплоть до точки Кюри (рис. 8), то при некоторой температуре $t_к$ происходит компенсация антипараллельных магнитных моментов обеих подрешеток. Из кривых на рис. 8 также следует, что ферриты имеют более низкую намагниченность насыщения J_s по сравнению с ферромагнетиками. Несмотря на этот недостаток, ферриты получили широкое распространение благодаря ряду замечательных магнитных свойств, а главным образом потому, что по величине удельного электрического сопротивления их можно отнести к полупроводниковым материалам. Это важное свойство ферритов,

ограничивающее величину вихревых токов, способствует их применению в отличие от ферромагнетиков на высоких частотах (до сотен мегагерц).

Параметры магнитных материалов и их намагничивание в постоянном поле

Для того чтобы оценить степень намагничивания магнитного материала, необходимо знать величину намагниченности J, которая для однородно намагниченного тела равна отношению магнитного момента к объему:

$$J = \frac{M}{V}, \quad (1)$$

Намагниченность, или интенсивность намагничивания, J зависит от величины напряженности магнитного поля H. Последняя характеризуется силой взаимодействия рассматриваемого поля с проводником, через который протекает электрический ток.

Для получения однородного поля создают кольцевую катушку с числом витков w, через которую протекает ток i требуемой величины. Напряженность поля в такой катушке при условии, что ее диаметр значительно превосходит диаметр витка, может быть получена из следующего выражения:

$$H = \frac{wi}{2\pi R_{ср}}, \ a/м \text{ в (системе СИ)}; \quad (2)$$

$$H = \frac{0,4wi}{2R_{ср}}, \ э \text{ (в системе СГСМ)}, \quad (2')$$

где i — ток, *а*;
$R_{ср}$ — средний радиус катушки, *м* (в системе СИ) и *см* (в системе СГСМ).

Между напряженностью поля H и намагниченностью вещества J существует прямая пропорциональность:

$$J = 4\pi\varkappa H = kH \text{ (в системе СИ)} \quad (3)$$

и

$$J = \varkappa H \text{ (в системе СГСМ)}, \quad (3')$$

где $\varkappa$ — магнитная восприимчивость, являющаяся физической характеристикой материала. Для ферромагнетиков и ферритов $\varkappa \gg 0$ и зависит от напряженности поля и температуры.

Намагниченность J можно рассматривать как внутреннее поле, возникающее в результате действия элементарных носителей магнетизма. Складываясь с внешним полем H, оно дает результирующее поле B, действующее на вещество. Суммарное поле, называемое магнитной индукцией, может быть представлено следующими формулами:

$$B = \mu_0(H + J), \ тл \text{ (в системе СИ)}, \quad (4)$$

где

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *гн/м*—магнитная постоянная;

$$B = H + 4\pi J, \ гс \text{ (в системе СГСМ)}, \quad (4')$$

причем 1 *тл*$=10^4$ *гс*.

Если в выражения (4) и (4′) подставить значения J из формул (3) и (3′), то они будут иметь следующий вид:

$$B = \mu_0 (1 + k) H = \mu_{абс} H \text{ (в системе СИ);} \quad (5)$$

$$B = (1 + 4\pi\varkappa) H = \mu'_{абс} H \text{ (в системе СГСМ),} \quad (5')$$

где $\mu_{абс} = (1+k)\mu_0$— абсолютная магнитная проницаемость, *тл·м/а* (в системе СИ) и $\mu'_{абс} = (1+4\pi\varkappa)$ — абсолютная магнитная проницаемость, *гс/э* (в системе СГСМ).

Иногда пользуются понятием относительной проницаемости, которая равна отношению абсолютной проницаемости к проницаемости вакуума:

$$\mu = \frac{\mu_{абс}}{\mu_0} = \mu'_{абс}. \quad (6)$$

Сопоставив выражения (5) и (6), можно установить, что

$$B = \mu H, \quad (7)$$

т. е. магнитная проницаемость показывает, во сколько раз напряженность поля в намагниченном веществе больше напряженности внешнего поля.

Поток магнитной индукции B через площадку сечением S равен произведению этих величин:

$$\Phi = BS. \quad (8)$$

В системе СИ единицей магнитного потока служит вебер (*вб*), а в системе СГСМ — максвелл (*мкс*), причем

$$1 \text{ вб} = 10^8 \text{ мкс}.$$

Величина магнитного потока Φ может определяться по аналогии с законом Ома как отношение м. д. с. F к магнитному сопротивлению $R_м$:

$$\Phi = \frac{F}{R_м}. \quad (9)$$

В этом выражении

$$F = Hl, \quad (10)$$

где H — напряженность поля;
l — длина магнитной цепи.

Для кольцевой катушки, рассмотренной выше, м. д. с. равна:

$$F_{кат} = iw, \text{ а (в системе СИ);} \quad (11)$$

$$F_{кат} = 0,4\,\pi iw, \text{ гб (гильберт) (в системе СГСМ);} \quad (12)$$

$$1 \text{ гб} = \frac{10}{4\pi} \text{ а}.$$

Магнитное сопротивление $R_м$ определяется по формуле

$$R_м = \frac{l}{\mu S}, \quad (13)$$

где l — длина магнитной цепи;
μ — магнитная проницаемость;
S — площадь поперечного сечения сердечника.

Полученное представление об основных параметрах магнитных материалов позволяет перейти к описанию процессов их намагничивания. При этом, учитывая область применения высокочастотных сердечников, основное внимание будет уделено закономерностям, характерным для слабых полей.

При монотонном возрастании напряженности поля магнитная индукция предварительно размагниченного образца будет также уве-

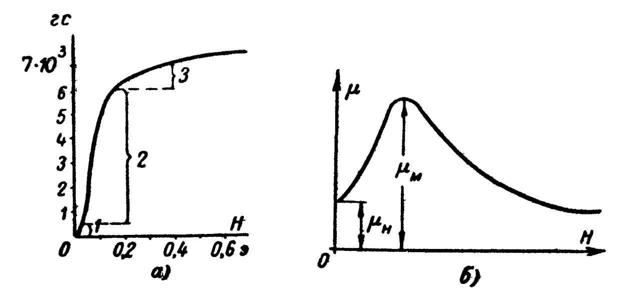


Рис. 9. Первоначальная кривая намагничивания ферромагнетиков (*а*) и зависимость проницаемости от напряженности поля (*б*).

личиваться, изменяясь по так называемой первоначальной или нулевой кривой намагничивания (рис. 9, *а*). Характер этой кривой свидетельствует о наличии трех основных областей намагничивания.

Для начального участка (*1*) зависимость B от H подчиняется закону Релея и соответствует обратимому смещению границ доменов. На этом участке намагничивания происходит обратимый рост объема благоприятно ориентированных по полю доменов за счет соседей.

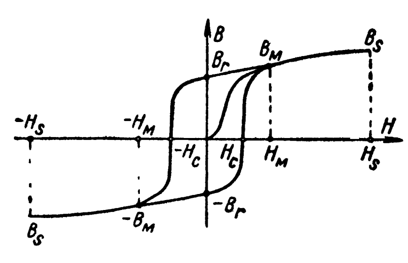


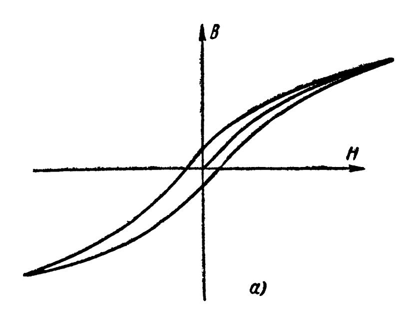
Рис. 10. Предельная петля гистерезиса ферромагнетиков.

На втором участке кривой (*2*) намагничивание осуществляется путем необратимых смещений границ доменов. Здесь индукция характеризуется нелинейной зависимостью от величины напряженности поля.

Третий участок кривой (3) соответствует обратимым процессам вращения магнитных моментов, приближая их к направлению поля. Индукция в этом случае медленно увеличивается до насыщения.

Если после построения кривой намагничивания воспользоваться значениями B и H и определять величину магнитной проницаемости, равной $\mu = B/H$, в зависимости от напряженности поля, то получим кривую $\mu = f(H)$, изображенную на рис. 9, *б*. Наиболее существенными на этой кривой являются два значения проницаемости: начальная $\mu_н$ и максимальная $\mu_{макс}$.

Если после достижения индукцией величины $+B_м$ (рис. 10) начнем уменьшать напряженность поля, то изменение индукции будет происходить не обратимо, а с отставанием на некоторую величину. При $H=0$ она будет соответствовать величине B_r, называемой *остаточной индукцией.* Для того чтобы снизить значение индукции до нуля, необходимо установить напряженность поля, равную — H_c. Эта величина напряженности является важным параметром материала и называется *коэрцитивной силой.*



Кривая зависимости $B=f(H)$ при изменении напряженности поля от $+H_м$ до $-H_м$ и от $-H_м$ до $+H_м$ называется предельной петлей гистерезиса. Выше вершины петли — точек $H_м$ и $B_м$ — намагничивание происходит без гистерезиса и изменение напряженности поля выше значения $\pm H_м$ не приводит к увеличению коэрцитивной силы и остаточной индукции.

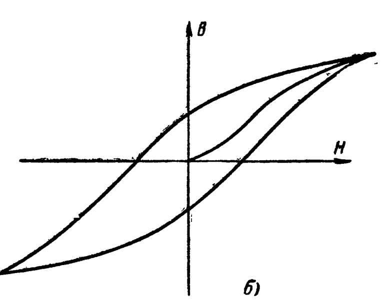


Рис. 11. Петли гистерезиса магнитномягких (*а*) и магнитнотвердых (*б*) материалов.

По форме петли гистерезиса можно судить об особенностях свойств различных магнитных материалов. *Магнитномягкие* высокочастотные материалы, к которым относятся магнитодиэлектрики на основе карбонального железа и альсифера, а также марганцевоцинковые и никельцинковые ферриты, характеризуются узкой петлей гистерезиса с малой коэрцитивной силой (рис. 11, *а*). Материалы для постоянных магнитов являются *магнитнотвердыми* и обладают высокими значениями коэрцитивной силы и остаточной индукции (рис. 11, *б*).

Кроме того, магнитномягкие материалы отличаются высокими значениями начальной и максимальной проницаемости.

Для высокочастотных материалов, работающих в основном в слабых полях (до 80 *а/м*), наибольший интерес представляет начальный участок кривой намагничивания (область Релея). Установлено, что на этом участке намагничивания проницаемость линейно зависит от напряженности поля и может быть представлена следующим выражением:

$$\mu_a = \mu_н \left(1 + \frac{\nu_н}{\mu_н} H_м\right) = \mu_н (1 + \alpha_м H_м), \qquad (14)$$

где μ_a — амплитудная проницаемость;

$\mu_н$ — начальная проницаемость;
$\nu_н$ — коэффициент Релея;
$H_м$ — амплитудное значение напряженности;
$\alpha_н$ — коэффициент амплитудной нестабильности проницаемости.

Протяженность релеевского участка, величина начальной проницаемости, форма и площадь петли гистерезиса для данного магнитного материала зависят от его чистоты и совершенства структуры. Примеси и искажения кристаллической решетки снижают величину начальной проницаемости, повышают значение коэрцитивной силы и остаточной индукции. Большое влияние на магнитные свойства в слабых полях оказывают дисперсность феррочастиц и их форма. Уменьшение размера частиц в пределах от 10 до 1 *мк* может снизить величину начальной проницаемости.

Влияние формы частиц связано с поляризацией магнитного тела при намагничивании, в результате которой в нем возникает размагничивающее поле $H_р$, ослабляющее внешнее поле H. Результирующее поле внутри тела равно:

$$H_т = H - H_р. \tag{15}$$

Напряженность размагничивающего поля зависит от формы тела и пропорциональна намагниченности J:

$$H_р = NJ, \tag{16}$$

где N — размагничивающий фактор, определяемый опытным путем.

Для тора $N=0$; для шара $N = \frac{4}{3}\pi$; для бесконечно длинного цилиндра, расположенного перпендикулярно полю, $N=2\pi$ и т. д. Проницаемость тела μ' соответствующей формы в системе СГСМ рассчитывается по проницаемости вещества μ и размагничивающему фактору N:

$$\mu' = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{N}{4\pi}}. \tag{17}$$

Магнитные свойства материалов на высоких частотах

В быстропеременных полях напряженность и индукция меняют свои направления и величины с частотой намагничивающего тока. Изменения H и B вызывают в магнитных сердечниках рассеивание энергии за счет потерь на гистерезис и вихревые токи и за счет дополнительных потерь.

Чтобы получить представление о физическом смысле всех составляющих потерь, следует рассмотреть эквивалентную схему кольцевой катушки индуктивности с сердечником (рис. 12). Индуктивность такой катушки L выражается следующим образом:

$$L = \frac{\mu_н S w^2}{\pi d_{ср}}, \ гн, \tag{18}$$

где w — число витков;
$\mu_н$ — начальная магнитная проницаемость, $тл \cdot м/а$;
S — площадь поперечного сечения сердечника, $м^2$;
$d_{ср}$ — средний диаметр сердечника, $м$.

Из приведенной эквивалентной схемы видно, что сопротивление потерь в катушке является суммой омических потерь в обмотке и магнитных потерь в сердечнике. Поэтому сопротивление магнитных потерь в сердечнике можно представить как

$$R_с = R_к - R_{обм}, \quad (19)$$

где $R_к$ — сопротивление потерь в катушке с сердечником;
$R_{обм}$ — сопротивление потерь в обмотке катушки.

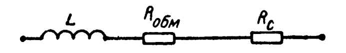


Рис. 12. Эквивалентная схема кольцевой катушки индуктивности с сердечником.

Добротность катушки Q пропорциональна величине ее индуктивности и обратно пропорциональна сопротивлению ее потерь:

$$Q = \frac{\omega L}{R_к}, \quad (20)$$

где ω — круговая частота;
L — индуктивность катушки;
$R_к$ — сопротивление потерь катушки.

Величина, обратная добротности, называется тангенсом угла потерь в катушке:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_к}{\omega L}. \quad (21)$$

Соответственно этому определению в сердечнике

$$\operatorname{tg} \delta_\mu = \frac{R_с}{\omega L}. \quad (22)$$

Сопротивление потерь в сердечнике в свою очередь можно представить как сумму сопротивления потерь на гистерезис $R_г$, сопротивления потерь на вихревые токи $R_в$ и сопротивления дополнительных потерь $R_д$, т. е.

$$R_с = R_г + R_в + R_д. \quad (23)$$

Из этого выражения вытекает, что и тангенс угла магнитных потерь также будет состоять из трех составляющих:

$$\operatorname{tg} \delta_\mu = \frac{R_г}{\omega L} + \frac{R_в}{\omega L} + \frac{R_д}{\omega L} = \operatorname{tg} \delta_г + \operatorname{tg} \delta_в + \operatorname{tg} \delta_д, \quad (24)$$

где $\operatorname{tg} \delta_г$ — тангенс угла потерь на гистерезис;
$\operatorname{tg} \delta_в$ — тангенс угла потерь на вихревые токи;
$\operatorname{tg} \delta_д$ — тангенс угла дополнительных потерь.

Расчетным путем получены формулы для всех трех составляющих.

При перемагничивании материалов в слабых переменных полях энергия потерь на гистерезис в единице их объема на один цикл равна:

$$W_г = \frac{\nu_н H_м^3}{3\pi} \cdot 10^{-7}\ , \ дж. \qquad (25)$$

Соответственно мощность потерь равна:

$$P_г = W_г f V_с = \frac{\nu_н H_м^3}{3\pi} f V_с \cdot 10^{-7} =$$

$$= \frac{\mu_н \alpha_н}{3\pi} H_м^3 f V_с \cdot 10^{-3}\ , \ вт, \qquad (26)$$

где f — частота, *гц*;
$V_с$ — объем сердечника, $м^3$.

Из этого выражения можно определить сопротивление потерь на гистерезис $R_г$ и, зная величину индуктивности L, получить следующее выражение для тангенса угла потерь на гистерезис:

$$\operatorname{tg} \delta_г = \frac{R_г}{\omega L} = \frac{4}{3\pi} \alpha_н H_м. \qquad (27)$$

Так как все магнитные материалы характеризуются определенной величиной проводимости, то при действии переменного поля в них возникают вихревые токи, сопровождаемые потерями энергии. Величина этих потерь зависит от геометрических размеров магнитопровода, его удельного сопротивления, величины индукции и частоты поля.

При относительно невысоких частотах, когда не наблюдается размагничивающего действия вихревых токов и поле в образце однородно, можно получить аналитическое выражение для мощности потерь в магнитопроводе интересующей нас формы. Так, например, для образца сферической формы (характерной, в частности, для частиц карбонильного железа) мощность потерь на вихревые токи равна:

$$P_в = \frac{\pi^2 d^2 B_м^2 f^2}{16\rho} V \cdot 10^{-16}\ , \ вт, \qquad (28)$$

где d — диаметр сферы;
$B_м$ — амплитудное значение индукции;
f — частота;
V — объем сферы;
ρ — удельное сопротивление.

Из этого выражения можно определить величину сопротивления потерь на вихревые токи $R_в$ и тангенс угла потерь на вихревые токи:

$$\operatorname{tg} \delta_в = \frac{R_в}{\omega L}. \qquad (29)$$

Установлено, что частотная зависимость потерь является более сложной и определяется не только возникновением вихревых токов, но и потерями на вязкость для карбонильного железа и резонансны-

ми явлениями для ферритов, которые более подробно будут рассмотрены ниже. Поэтому более правильно будет тангенс угла потерь, зависящий от частоты, называть тангенсом угла частотных потерь $\mathrm{tg}\,\delta_ч$.

Третья часть потерь, которая не зависит от напряженности и частоты переменного поля, называется дополнительной составляющей потерь и формально определяется как разница между суммарным тангенсом угла магнитных потерь в сердечнике и тангенсом углов потерь на гистерезис и частотных потерь, т. е.

$$\mathrm{tg}\,\delta_д = \mathrm{tg}\,\delta_\mu - (\mathrm{tg}\,\delta_г + \mathrm{tg}\,\delta_ч). \qquad (30)$$

Природа дополнительных потерь окончательно не установлена, но есть предположение, что их причиной служат микровихревые токи, возникающие при смещении границ доменов в начальной области намагничивания, а их величина зависит от химического состава магнитного материала и его дисперсности.

Для сравнительной оценки различных материалов принято пользоваться коэффициентами потерь. Коэффициент потерь на гистерезис равен отношению тангенса угла потерь на гистерезис к амплитудному значению напряженности поля:

$$\delta_ч = \frac{\mathrm{tg}\,\delta_г}{H_м}, \quad \frac{1}{а/м}. \qquad (31)$$

Коэффициент частотных потерь равен отношению тангенса угла частотных потерь к соответствующему значению частоты:

$$\delta_ч = \frac{\mathrm{tg}\,\delta_ч}{f}, \quad 1/гц. \qquad (32)$$

Коэффициент дополнительных потерь равен значению тангенса угла дополнительных потерь и является безразмерной величиной:

$$\delta_д = \mathrm{tg}\,\delta_д. \qquad (33)$$

Зная значение коэффициента потерь, можно определить суммарную величину тангенса угла магнитных потерь при данной частоте f и амплитудном значении напряженности поля $H_м$:

$$\mathrm{tg}\,\delta_\mu = \delta_г H_м + \delta_ч f + \delta_д. \qquad (34)$$

Эксплуатация сердечников в быстропеременных полях сопровождается также влиянием внешних факторов, к которым в первую очередь следует отнести температуру, влажность и воздействие посторонних полей. Изменение температуры оказывает влияние на магнитокристаллографическую и магнитоупругую анизотропию вещества. В результате меняются форма петли гистерезиса, вид кривой намагничивания и величина начальной проницаемости, которая, как правило, растет с увеличением температуры. Для некоторых материалов температурная зависимость начальной проницаемости до точки Кюри характеризуется несколькими максимумами.

Для оценки относительного изменения проницаемости при соответствующем изменении температуры можно воспользоваться значе-

ниями температурного коэффициента в заданном интервале температур:

$$\text{ТК}\,\mu = \frac{\mu_{t2} - \mu_{t1}}{\mu_{t1}(t_2 - t_1)}, \qquad (35)$$

где ТКμ — температурный коэффициент проницаемости;
μ_{t2} и μ_{t1} — значения проницаемости при температурах t_2 и t_1.

Определенное влияние температура оказывает и на величину потерь, так как под ее воздействием изменяются проводимость материала, форма петли гистерезиса и диффузионные процессы перераспределения атомов примесей в кристаллической решетке происходят более интенсивно.

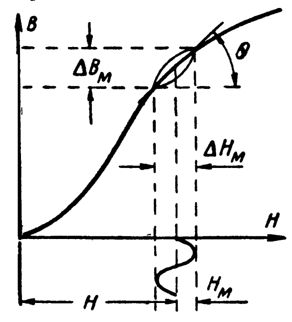


Рис. 13. Намагничивание при одновременном воздействии переменного и постоянного полей.

Так же как и проницаемость, изменение потерь для соответствующего интервала температур можно оценить по температурному коэффициенту тангенса угла магнитных потерь:

$$\text{ТК}\,\mathrm{tg}\,\delta_\mu = \frac{\mathrm{tg}\,\delta_{t2} - \mathrm{tg}\,\delta_{t1}}{\mathrm{tg}\,\delta_{t1}(t_2 - t_1)}, \qquad (36)$$

где $\mathrm{tg}\,\delta_{t2}$ и $\mathrm{tg}\,\delta_{t1}$ — значения тангенса угла магнитных потерь при температурах t_2 и t_1.

Для практического использования высокочастотных сердечников, работающих в слабых полях, очень большое значение имеет стабильность проницаемости как при отсутствии внешнего постоянного поля, так и при эксплуатации в режиме подмагничивания.

В первом случае о стабильности проницаемости можно судить по значению коэффициента амплитудной нестабильности $\alpha_н$, полученному из формулы Релея (14):

$$\alpha_н = \frac{\mu_{a2} - \mu_{a1}}{\mu_н (H_2 - H_1)}, \qquad (37)$$

где μ_{a2} и μ_{a1} — значения амплитудной проницаемости при напряженностях поля H_2 и H_1; $\mu_н$ — относительная начальная проницаемость.

Величина коэффициента амплитудной нестабильности определяется формой кривой намагничивания в области Релея, зависящей от физико-химического состава и структуры магнитного материала и механизма его намагничивания.

При наличии постоянной составляющей магнитного поля, обусловленной режимом работы сердечника или влиянием внешних полей (рис. 13), о стабильности проницаемости судят по величине обратимой магнитной проницаемости:

$$\mu_r = \mathrm{tg}\,\theta = \frac{\Delta B_м}{\Delta H_м}. \qquad (38)$$

Этот параметр также определяется формой кривой намагничивания, но уже в области средних полей.

На электромагнитные параметры сердечников, в особенности на величину магнитной проницаемости, большое влияние оказывают продолжительность и условия их эксплуатации. Попеременное воздействие положительных и отрицательных температур и влажности окружающего воздуха могут вызвать необратимые изменения в кристаллической структуре магнитного материала, его окисление и перераспределение примесей. В случае магнитодиэлектрических сердечников эти факторы могут вызывать старение диэлектрической связки, а в некоторых случаях и потерю изолирующих свойств.

Для стабилизации магнитных свойств при воздействии температуры сердечники подвергают искусственному старению путем термотренировки, а для исключения неблагоприятного воздействия влаги их пропитывают водостойкими веществами или герметизируют.

Временна́я стабильность сердечников оценивается по относительному изменению начальной проницаемости в течение заданного времени. Магнитные материалы, проницаемость которых в течение года изменяется не более чем на 0,1—0,2% первоначальной величины, считаются стабильными.

ГЛАВА ВТОРАЯ
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕРДЕЧНИКОВ

Магнитодиэлектрики в слабых полях высокой частоты

В диапазоне радиочастот от 0,1 до 100 *Мгц* наибольшее распространение получили альсиферовые и карбонильные магнитодиэлектрические сердечники разных размеров и форм, обладающие различными электромагнитными параметрами.

Магнитодиэлектрики, предназначенные для работы в слабых полях высокой частоты, состоят из высокодисперсных ферромагнитных частиц, изолированных друг от друга с помощью электроизоляционного вещества.

На рис. 14 показана структура магнитодиэлектрика, изображение которой получено с помощью металломикроскопа. Между частицами карбонильного железа (белые кружки) находится связующее вещество.

Проницаемость магнитодиэлектрика зависит от проницаемости ферромагнитной основы и ее концентрации p, которая определяется отношением объема ферромагнитной основы $V_ф$ ко всему объему магнитодиэлектрика $V_м$:

$$p = \frac{V_ф}{V_м}.$$

Если известны проницаемость ферромагнетика $\mu_ф$ и значение концентрации p, то проницаемость магнитодиэлектрика $\mu_м$ можно вычислить по формуле Лихтенеккера:

$$\mu_м = \mu_ф^p.$$

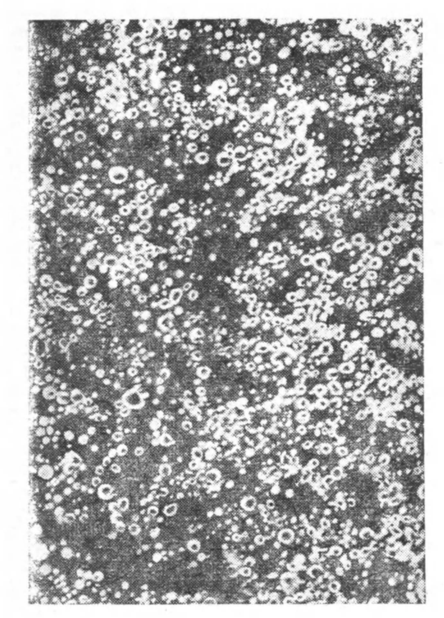


Рис. 14. Структура магнитодиэлектрика.

Из этой формулы видно, что проницаемость магнитодиэлектрика в сильной степени зависит от концентрации ферромагнитной основы и при p, близком к единице, почти равна проницаемости ферромагнетика.

В отличие от ферромагнетика петля гистерезиса магнитодиэлектрика в области Релея характеризуется большей пологостью и меньшей площадью. Это объясняется влиянием на процесс перемагничивания размагничивающего действия полюсов ферромагнитных частиц.

Бóльшая пологость петли гистериза определяет меньшую величину коэффициента амплитудной нестабильности магнитодиэлектрика по сравнению с ферромагнетиком, которая может быть представлена следующим выражением:

$$\alpha_м = \alpha_ф \left(\frac{\mu_м}{\mu_ф}\right)^2 \frac{1}{p^2}, \qquad (39)$$

где $\alpha_м$ — коэффициент амплитудной нестабильности магнитодиэлектрика;

$\alpha_ф$ — коэффициент амплитудной нестабильности ферромагнетика;

$\mu_м$ — начальная проницаемость магнитодиэлектрика;

$\mu_ф$ — начальная проницаемость ферромагнетика;

p — концентрация ферромагнитной основы.

При воздействии на магнитодиэлектрик температуры изменение его проницаемости зависит от величины температурного коэффициента проницаемости ферромагнетика и значений коэффициентов температурного расширения диэлектрика и ферромагнетика.

Преобразовав соответствующим образом формулу Лихтенеккера, можно получить выражение для температурного коэффициента проницаемости магнитодиэлектрика:

$$ТК\,\mu_м = pТК\,\mu_ф - \gamma_t (1 - p) \ln \mu_ф, \qquad (40)$$

где $ТК\mu_м$ — температурный коэффициент проницаемости магнитодиэлектрика;

$ТК\mu_ф$ — температурный коэффициент проницаемости ферромагнитной основы;

$\gamma_t = \Delta\vartheta / \vartheta (t_2 - t_1)$ — коэффициент, зависящий от объемного расширения диэлектрика и всего магнитодиэлектрика;

$$\vartheta = 1 - p.$$

Стабильность проницаемости магнитодиэлектриков во времени зависит не только от тех факторов, которые уже рассматривались для ферромагнетиков, но и от изменения объема диэлектрика в процессе старения. Последнее может быть вызвано окислением ферромагнитных частиц, в результате которого увеличивается объем диэлектрика и уменьшается соответственно концентрация ферромагнитной основы, а следовательно, и величина проницаемости.

При работе магнитодиэлектрических сердечников в слабых полях высокой частоты в них возникают гистерезисные, частотные и дополнительные потери, которые зависят от величин соответствующих потерь в ферромагнетике, его проницаемости и концентрации, электропроводности и проницаемости сердечника.

Потери на гистерезис определяются коэффициентом гистерезисных потерь ферромагнетика $\delta_{г.ф}$, проницаемостями ферромагнетика $\mu_ф$ и сердечника $\mu_м$ и концентрацией p. Выражение для коэффициента потерь на гистерезис магнитодиэлектрика выглядит следующим образом.

$$\delta_{г.м} = \delta_{г.ф} \left(\frac{\mu_м - 1}{\mu_ф - 1} \right)^3 \frac{\mu_ф}{\mu_м} \cdot \frac{1}{p^2}, \tag{41}$$

Частотные потери складываются из потерь на вихревые токи и вязкость в ферромагнитных частицах и на вихревые макротоки, протекающие по телу сердечника:

$$\delta_{ч.м} = \frac{1}{p} (\delta_{ч.ф} + \delta_{в.с}), \tag{42}$$

где $\delta_{ч.ф}$ — коэффициент частотных потерь в ферромагнитных частицах;

$\delta_{в.с}$ — коэффициент потерь на вихревые макротоки в теле сердечника.

Для магнитодиэлектриков с частицами сферической формы коэффициент потерь на вихревые микротоки равен:

$$\delta_в = 0{,}2\,\pi^2 \frac{d^2}{\rho} \cdot \frac{\mu_м}{p} \cdot 10^{-9}, \ 1/гц, \tag{43}$$

где d — диаметр частицы, *см*;

ρ — удельное сопротивление частицы, *ом · см*.

Коэффициент дополнительных потерь $\delta_{д.м}$ также может быть связан с соответствующим коэффициентом ферромагнетика $\delta_{д.ф}$:

$$\delta_{д.м} = \delta_{д.ф} \frac{\mu_м}{\mu_ф} p. \tag{44}$$

Исследования показали, что при размерах ферромагнитных частиц не более 5 *мк* и концентрации ферромагнитной основы $p < 80\%$ проницаемость магнитодиэлектриков в диапазоне частот до 100 *Мгц* от частоты не зависит, а тангенс угла потерь характеризуется линейной зависимостью от частоты.

Для некоторых областей применения представляют интерес электрические свойства магнитодиэлектриков. Расчетным путем най-

дены выражения для удельной электропроводности магнитодиэлектрика $\sigma_м$:

$$\sigma_м = \sigma_д \left(1 + \frac{p}{1 - \sqrt[3]{p}}\right), \tag{45}$$

где $\sigma_д$ — проводимость диэлектрика, и его диэлектрической проницаемости $\varepsilon_м$:

$$\varepsilon_м = \varepsilon_д \left(1 + \frac{p}{1 - \sqrt[3]{p}}\right), \tag{46}$$

где $\varepsilon_д$ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

При малой концентрации ферромагнитной основы ($p<20\%$) можно считать, что угол диэлектрических потерь в магнитодиэлектрике равен углу диэлектрических потерь в диэлектрике, т. е.

$$\operatorname{tg} \delta_{м\varepsilon} = \operatorname{tg} \delta_{д\varepsilon}. \tag{47}$$

Влияние ферромагнетика и диэлектрика на электромагнитные свойства магнитодиэлектрика

Альсифер, используемый как ферромагнитная основа магнитодиэлектрических сердечников, представляет собой сплав железа, алюминия и кремния. Для высокочастотных сердечников используются альсиферовые порошки марок РЧ-6, РЧ-9 и ФИ с частицами размером от 12 до 25 *мк* из сплава, содержащего 9,8—10,2% кремния, 7,3—7,5% алюминия и 82,9—82,3% железа. При этом оптимальном составе достигается наибольшее значение начальной проницаемости ферромагнетика и снижается проводимость частиц по сравнению с чистым железом.

Установлено, что с увеличением содержания алюминия и кремния начальная проницаемость и коэффициент частотных потерь уменьшаются. При содержании кремния в пределах 9,4—10,2% и алюминия 7,5% коэффициент потерь на гистерезис минимален. Аналогичный результат можно получить при содержании алюминия в пределах 7,2—8% и кремния 10%.

Большой интерес представляет возможность получать сердечники из альсифера с $ТК\mu_н$ различных величин и знаков в зависимости от состава сплава. При увеличении содержания алюминия и кремния температурный коэффициент проницаемости уменьшается и, перейдя через нуль, становится отрицательным.

Как в любом магнитном материале, примеси в альсифере ухудшают его электромагнитные свойства. Особенно сильное влияние на них оказывает углерод. Для получения сердечников с заданными электромагнитными параметрами в альсифере допускается содержание углерода не более 0,03% при общем содержании примесей до 0,3%. В противном случае растут гистерезисные и дополнительные потери и зависимость проницаемости от температуры изменяет свой характер.

Как видно из выражения (43), размер частиц оказывает сильное влияние на величину коэффициента потерь на вихревые микротоки. К сожалению, по технологическим причинам наиболее высокочастотный альсиферовый порошок марки РЧ-6 имеет средний диа-

метр частиц 12 *мк*. Поэтому альсиферовые сердечники на высоких частотах не применяются.

Для радиочастотного диапазона наибольшее распространение получили сердечники на основе высокодисперсного карбонильного железа, которое выпускается в виде порошков двух классов: первичные порошки марок Р-10, Р-20, Р-100, П, $П_с$ и вторичный порошок ВКЖ.

Перечисленные марки порошков различаются физико-химическими и электромагнитными свойствами. К физико-химическим свойст-

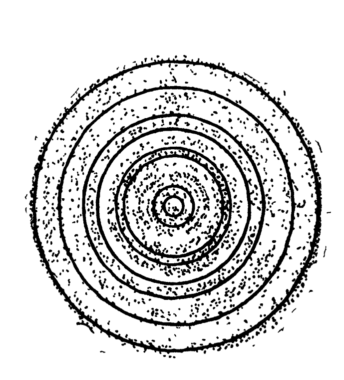


Рис. 15. Микроструктура ферромагнитных частиц первичных карбонильных порошков.

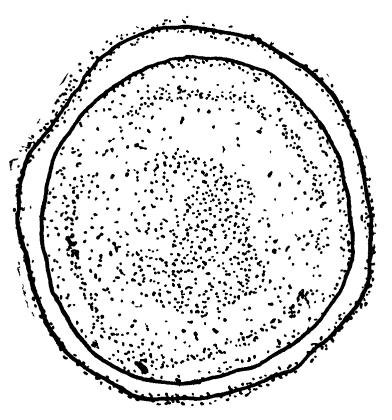


Рис. 16. Микроструктура ферромагнитных частиц вторичного порошка марки ВКЖ.

вам карбонильных ферропорошков следует отнести их микроструктуру, размер частиц, содержание углерода, азота и кислорода.

Микроструктура частиц первичных порошков характеризуется сферической формой и сложным («луковичным») строением (рис. 15). Средний диаметр частиц может колебаться в пределах от 1,5 до 8 *мк* в зависимости от условий получения карбонильного железа.

Примеси углерода, азота и кислорода в первичных порошках находятся в основном в связанном виде и образуют карбид (Fe_3C), нитрид (Fe_4N) и окисел железа (Fe_2O_3), содержание которых определяется технологией производства соответствующей марки порошка.

Процесс получения порошков карбонильного железа основан на термическом разложении пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$ в присутствии аммиака. В результате образуются сферические железные частицы, а освобождающаяся окись углерода возвращается на стадию синтеза $Fe(CO)_5$. Изменяя параметры технологического процесса и отношение участвующих в реакции компонентов, можно управлять физико-химическими свойствами карбонильных порошков.

Вторичный порошок марки ВКЖ (восстановленное карбонильное железо) получается путем термообработки первичного порошка марки Р-10 в токе водорода. При этом содержание примесей снижается до минимума и «луковичная» структура исчезает (рис. 16).

Обобщенные физико-химические характеристики порошков карбонильного железа, от которых зависят их электромагнитные свойства, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические характеристики порошков карбонильного железа

Марка порошка	Химический состав, %				$d_{ср}$, *мк*	Структура ферромагнитных частиц
	Fe	C	N	O_2		
Р-10	97,8—96,6	0,8—1,2	0,6—1,0	0,8—1,2	3,5	„Луковичная“
Р-20	98,9—97	0,7—0,9	0,6—0,9	0,8—1,2	2,5	„
Р-100	98,9—97	0,7—0,9	0,6—0,9	0,8—1,2	1,5	„
П	97,65—97,15	0,6—0,45	0,5—0,8	0,8—1,2	2,5	„
Пс	97,65—97,15	0,6—0,45	0,5—0,8	0,8—1,2	2,0	„
ВКЖ	99,99	0,1	—	—	3,5	Кристаллическая

Начальная проницаемость $\mu_н$ первичных порошков мало зависит от физико-химических свойств, так как они все характеризуются наличием «луковичной» структуры и содержат примеси в пределах от 2,1 до 3,4%. Однако порошки марок Р-100 и $П_с$ отличаются, как правило, меньшим значением проницаемости, потому что они состоят из частиц меньшего размера ($d_{ср}=1{,}5—2$ *мк*). С уменьшением размера частиц начальная проницаемость понижается, так как затрудняются процессы смещения границ доменов.

Значительная разница в проницаемости между первичными и вторичными порошками вызвана уменьшением содержания примеси ($C \leqslant 0{,}1\%$) и отсутствием «луковичной» структуры. В результате интенсивность смещений границ доменов в частицах порошка ВКЖ резко увеличивается, что приводит к увеличению проницаемости.

Коэффициент потерь на гистерезис $\delta_г$ у первичных порошков марок Р-10 и Р-20 больше, чем у порошка марки П. Эту разницу можно объяснить влиянием примесей, которые повышают коэрцитивную силу. Наряду с этим при одинаковом содержании примесей в частицах порошков Р-10, Р-20 и Р-100 последний имеет меньшую величину $\delta_г$ из-за меньшей проницаемости. Аналогичное объяснение можно дать различным значениям $\delta_г$ для порошков марок П и $П_с$, имеющих одинаковый химический состав, но различную дисперсность.

Наибольшую величину $\delta_г$ имеет вторичный порошок ВКЖ, хотя он отличается минимальным содержанием примесей и не обладает «луковичной» структурой. Можно предположить, что в данном случае преобладающее влияние на рост гистерезисных потерь оказывают структурные искажения, вызванные образованием пор при термообработке первичного порошка.

Коэффициент частотных потерь $\delta_ч$, характеризующий порошки карбонильного железа с точки зрения использования их для требуемого диапазона частот, зависит от дисперсности частиц, наличия «луковичной» структуры и химического состава.

Как видно из выражения (43), с уменьшением размера частиц потери на вихревые токи, возникающие в них под действием переменного поля, снижаются по квадратичной зависимости. Поэтому значения $\delta_ч$ для порошков марок Р-100 и $П_с$ ниже, чем для порошков остальных марок.

Влияние химического состава на величину $\delta_ч$ обусловлено магнитной вязкостью, зависящей от содержания в частицах примесей углерода и азота. Этим и можно объяснить наблюдаемую разницу в величине $\delta_ч$ для порошков марок Р-10 и Р-20 по сравнению с порошком марки П, содержащим меньшее количество примесей.

Порошок марки ВКЖ отличается наибольшей величиной $\delta_ч$, что вызвано отсутствием в частицах «луковичной» структуры и как следствие повышенной электропроводностью частиц.

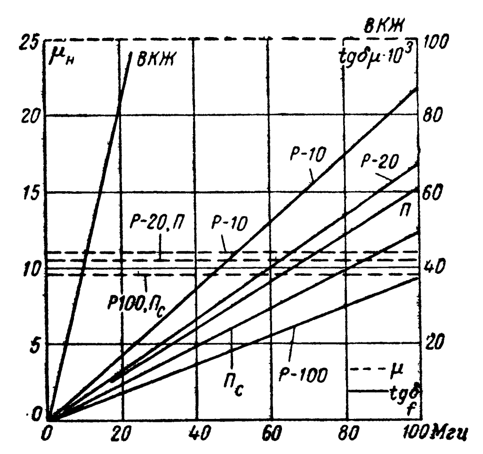


Рис. 17. Зависимость тангенса угла магнитных потерь (сплошные линии) и начальной проницаемости (штриховые линии) от частоты магнитодиэлектриков на основе порошков карбонильного железа.

Коэффициент дополнительных потерь, который в физическом смысле можно характеризовать как часть потерь на гистерезис, отнесенную к области начального намагничивания, зависит, как и $\delta_г$, от размера частиц, химического состава и структуры их.

Температурный коэффициент магнитной проницаемости ($ТК\mu_н$) карбонильного железа по знаку положителен, но его величина зависит от условий получения порошков карбонильного железа и косвенным образом связана с содержанием углерода в частицах порошка. Степень науглероженности определяется температурой, при которой происходит процесс формирования частиц порошка.

Температура снимает напряжения в кристаллической решетке ферромагнитных частиц, которые влияют на величину $ТК\mu_н$.

Наименьшим значением $ТК\mu_н$ отличаются первичные порошки П и $П_с$; большая величина этого параметра характерна для первичных порошков Р-10, Р-20 и Р-100. Наибольшим значением $ТК\mu_н$ обладает вторичный порошок ВКЖ, так как он подвергается термообработке при высокой температуре.

Для оценки частотных характеристик порошков карбонильного железа на рис. 17 показана зависимость тангенса угла магнитных

потерь $\operatorname{tg} \delta_\mu$ и начальной магнитной проницаемости $\mu_н$ от частоты в диапазоне до 100 *Мгц*.

Вид приведенных кривых показывает, что $\operatorname{tg} \delta_\mu$ всех рассматриваемых порошков характеризуется линейной зависимостью от частоты, а $\mu_н$ от частоты не зависит, причем наименьшими потерями характеризуются порошки марок Р-100 и $П_с$.

Электромагнитные параметры магнитодиэлектрических сердечников в значительной степени зависят также от свойств диэлектрика, его концентрации и метода изоляции ферромагнитных частиц.

Введение диэлектрика предусматривает, разделение ферромагнитных частиц, с одной стороны, для снижения вихревых макротоков и, с другой — для связывания изолированных частиц с целью получения компактных и механически прочных магнитодиэлектрических сердечников.

Наиболее распространенными диэлектриками при изготовлении сердечников являются искусственные полимерные материалы: полистирол и бакелитовая (фенолформальдегидная) смола. Хотя эти диэлектрики различаются в значительной степени диэлектрическими свойствами на высоких частотах, выбор их определяется только методом получения сердечников. При изготовлении сердечников методом литья под давлением применяется термопластичный полимер — полистирол. При холодной прессовке используется термореактивная бакелитовая смола.

Возможность использования такого относительно низкокачественного диэлектрика, как бакелитовая смола, объясняется тем, что доминирующую роль в потерях энергии играет магнитная составляющая. Применение диэлектрика сводится в основном только к отделению ферромагнитных частиц друг от друга во избежание металлического контакта. При использовании крупных частиц (более 10 *мк*) и концентрации ферромагнитной основы до 80% хорошая изоляция достигается применением одного из упомянутых диэлектриков. Таким способом изолируются альсиферовые порошки марок РЧ-6 и ФИ. В случае же изготовления сердечников на основе высокодисперсных порошков карбонильного железа для достижения максимальной величины электромагнитных параметров необходимо осуществлять двойную изоляцию ферромагнитных частиц. В качестве первичной изоляции применяется жидкое стекло, обладающее хорошей адгезией (прилипаемостью) к частицам железа, или же порошок обрабатывается ортофосфорной кислотой, в результате чего на частицах образуется изолирующая пленка фосфата железа. Ферромагнитные частицы, покрытые тонкой изоляционной пленкой, в дальнейшем подвергаются вторичной изоляции с помощью связующего вещества. Об эффективности метода двойной изоляции карбонильного железа марки Р-20 можно судить по данным табл. 2.

Из приведенных данных видно, что из карбонильного железа, обработанного ортофосфорной кислотой, можно получить сердечники с максимальными значениями электромагнитных параметров.

Образующаяся на поверхности частиц пленка фосфата железа обладает хорошей адгезией, высокой механической прочностью и хорошими изолирующими свойствами. Еще одно преимущество фосфатированного карбонильного железа заключается в том, что оно обеспечивает повышение влагостойкости сердечников в 2—3 раза по сравнению с сердечниками, содержащими жидкое стекло. Как видно из формулы (40), величина температурного коэффициента расширения диэлектрика и его концентрация определяют величину темпе-

ратурного коэффициента магнитной проницаемости магнитодиэлектрика. Сердечники с полистироловым связующим по сравнению с сердечниками с бакелитовым связующим при одинаковой концентрации феррита обладают меньшим значением ТК$\mu_н$. При значительной концентрации полистирола (более 50%) можно получить сердечники с отрицательным ТК$\mu_н$, хотя само карбонильное железо имеет положительный температурный коэффициент магнитной проницаемости.

Таблица 2

Электромагнитные параметры тороидальных сердечников на основе карбонильного железа марки Р-20 с различной изоляцией

Состав изоляции	$\mu_н$	$\delta_г \cdot 10^6$, *м/а*	$\delta_ч \cdot 10^9$, 1/*гц*	$\delta_д \cdot 10^3$	$\text{tg}\,\delta \cdot 10^3$ (f=5 *Мгц*)
4,2% бакелитовой смолы . .	12,1	6,6	3,5	0,20	9,7
0,2% жидкого стекла и 4% бакелитовой смолы	11,6	3,4	2,3	0,17	7,4
0,2% ортофосфорной кислоты и 4% бакелитовой смолы .	11,2	1,8	1,2	0,12	5,3

От концентрации диэлектрика и эффективности защиты поверхности ферромагнитных частиц зависит временнàя стабильность сердечников. Магнитодиэлектрики из фосфатированного карбонильного железа при концентрации диэлектрика не менее 20% изменяют проницаемость за год не более чем на 0,2%. С увеличением концентрации диэлектрика временнàя стабильность повышается, но при этом снижается величина начальной проницаемости при одновременном снижении потерь. Поэтому выбор оптимальной концентрации диэлектрика должен определяться конкретными условиями работы сердечников и предъявляемыми к ним техническими требованиями.

Методы изготовления магнитодиэлектрических сердечников и их электромагнитные параметры

Изготовление магнитодиэлектрических сердечников предусматривает изоляцию ферромагнитных частиц, получение пресспорошка, его прессовку в сердечники требуемой формы и их термообработку.

Альсиферовый порошок марки РЧ-6 в связи с относительно низкой объемной концентрацией ферромагнетика (около 50%) изолируется одним слоем полистиролового лака. Взятые в требуемом соотношении компоненты перемешиваются в специальной мешалке до полного улетучивания растворителя. Полученная смесь подсушивается на воздухе и передается на прессовку. Прессование может производиться обычным способом при нагреве пресспорошка до 130° С в течение 5—10 *мин* или способом литья под давлением при удельном давлении 1 *Т/см*^{2}.

Для порошка марки РЧ-9 применяется метод двойной изоляции частиц: первичный слой — 12% аминопласта, вторичный — 10% бакелитовой смолы. Пресспорошок также получается лаковым способом, а прессовка его осуществляется холодным методом при удельном давлении 10—12 *Т/см²*. Для полимеризации бакелитовой смолы спрессованные сердечники подвергают термообработке при температуре 130° С.

Альсиферовый порошок марки ФИ изолируется только бакелитовой смолой в количестве 4% по отношению к весу порошка. Прессовка производится холодным методом при удельном давлении 12—15 *Т/см²*. Спрессованные сердечники подвергаются термообработке при 600° С в вакууме. При этом бакелитовая смола по существу выгорает, что сопровождается увеличением потерь в сердечниках. Во избежание этого нежелательного явления для изоляции ферромагнитных частиц следует использовать нагревостойкие кремнийорганические смолы.

Из альсиферовых порошков марок РЧ-6, РЧ-9 и ФИ изготавливаются в основном цилиндрические сердечники. Для оценки качества выпускаемых сердечников в табл. 3 приведены электромагнитные параметры тороидальных сердечников, изготовленных на основе альсиферовых порошков. Из таблицы видно, что для частот более 100 *кгц* целесообразнее использовать сердечники из альсифера марок РЧ-6 и РЧ-9, так как они имеют меньшие частотные потери.

Таблица 3

Электромагнитные параметры тороидальных альсиферовых сердечников

Марка сердечника	$\mu_н$	ТК $\mu \cdot 10^6$, 1/°С	$\delta_г \cdot 10^6$, *м/а*	$\delta_ч \cdot 10^9$, 1/*гц*	$\delta_д \cdot 10^3$
РЧ-6	6	—100	3,6	2	0,4
РЧ-9	9	—100	9,6	3	0,7
ФИ	20—24	±150	42	30	1,0

Порошки карбонильного железа, отличаясь более высокой дисперсностью, требуют при изготовлении сердечников двойной изоляции. В настоящее время в качестве первичной изоляции используется жидкое стекло (0,2% к весу порошка), а связующим веществом служит бакелитовая смола в количестве 4%. Слои диэлектрика наносятся на ферромагнитные частицы карбонильного железа поочередно. Для первичной изоляции порошок в требуемом количестве засыпается в смеситель и при непрерывном перемешивании заливается раствором жидкого стекла в дистиллированной воде, составляющей 10—12% к весу порошка. Смесь перемешивают в течение 30 *мин* при комнатной температуре, а затем, не прекращая перемешивания, нагревают до 100° С до полного ее высыхания, после чего смесь охлаждают до комнатной температуры.

Для нанесения второго слоя изоляции в смеситель при непрерывном перемешивании заливается бакелитовый лак и добавляется

15—20% этилового спирта. После высыхания пресспорошок просеивается через сито № 0,63 и передается на прессовку. Сердечники требуемой формы прессуются при удельном давлении от 6 до 16 *Т/см*². Термообработка сердечников на основе порошков класса Р состоит в выдержке их на воздухе при комнатной температуре в течение 4 *ч*, нагреве в течение 1 *ч* до 130° С, выдержке при этой температуре в течение 4 *ч* и медленном охлаждении.

Для сердечников, изготавливаемых на основе порошков класса П и характеризующихся повышенной временно́й стабильностью, проводится специальная ступенчатая термообработка и искусственное старение.

При использовании в качестве изоляции термопластичных полимеров типа полистирола прессовка осуществляется литьем под давлением или горячим способом при температуре 130—150° С. При этом величина удельного давления составляет 1—2 *Т/см*².

Как уже отмечалось выше, фосфатирование порошков карбонильного железа обеспечивает получение сердечников с более высокими электромагнитными параметрами и большей стабильностью, чем при использовании жидкого стекла.

Для получения на ферромагнитных частицах фосфатной пленки в смеситель с порошком заливается раствор ортофосфорной кислоты в ацетоне. При этом количество кислоты берется равным 0,2% веса порошка, а ацетона 20%. Компоненты перемешиваются при комнатной температуре до полного высыхания. Полученный пресспорошок подвергается последующим рассмотренным ранее операциям.

Электромагнитные параметры магнитодиэлектриков на основе карбонильных порошков приведены в табл. 4. Данные таблицы позволяют оценить оптимальный частотный диапазон эксплуатации карбонильных сердечников и основные области их применения.

Таблица 4

Электромагнитные параметры тороидальных сердечников из карбонильного железа

Сердечник из порошка марки	$\mu_н$	$\delta_г \cdot 10^6$, *м/а*	$\delta_ч \cdot 10^9$, 1/*гц*	$\delta_д \cdot 10^3$	tg $\delta\mu$ (f=80 *Мгц*)	ТК $\mu_н \cdot 10^6$, 1/°С
Р-10	12,0	3,3	4,0	0,23	0,08	150—250
Р-20	11,0	3,4	2,30	0,17	0,06	80—150
Р-100	10,5	0,8	0,90	0,10	0,03	50—125
П	11,6	1,4	1,80	0,13	0,05	30—60
$П_с$	10,4	0,6	1,00	0,11	0,04	30—60
ВКЖ	25	3,3	11,0	0,85	0,40	250—350

Примечание. Сердечники с двойной изоляцией (0,2% жидкого стекла и 4% бакелитовой смолы) прессовались при удельном давлении 10 *Т/см*².

Сердечники на основе порошков Р-10, Р-20 и Р-100 целесообразно использовать для катушек индуктивности радиоприемных и передающих устройств в диапазонах частот соответственно до 10, 20 и 100 *Мгц*.

Сердечники на основе порошков марок П и $П_с$ благодаря низкой величине коэффициента потерь на гистерезис рекомендуется использовать при изготовлении фильтров проводной аппаратуры для диапазона частот до 20 *Мгц*.

Достоинством магнитодиэлектрических сердечников являются низкая величина потерь, высокая температурная, временна́я и амплитудная стабильность, линейная зависимость потерь от частоты и постоянство значения проницаемости в широком диапазоне частот (до сотен мегагерц) и напряженностей поля (до 80 *а/м*). Их недостаток — относительно невысокое значение начальной проницаемости, что ограничивает возможность повышения добротности катушек индуктивности и уменьшения их габаритов до желаемых пределов. В этом отношении некоторые преимущества имеют ферриты, которые при определенных условиях эксплуатации могут заменить магнитодиэлектрические сердечники.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФЕРРИТОВЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Основы технологии и магнитные свойства магнитномягких ферритов

Из всего многообразия ферритов для изготовления высокочастотных сердечников применяются только магнитномягкие никель-цинковые, марганец-цинковые, свинцово-никелевые и медно-никель-цинковые ферриты. Электромагнитные свойства ферритов зависят от их состава и технологии изготовления.

Технологический процесс изготовления ферритов состоит из трех основных операций: приготовление исходной смеси окислов, прессовка шихты в сердечники требуемой формы и термообработка последних.

В настоящее время наиболее распространенным методом приготовления шихты является смешивание высокодисперсных порошкообразных окислов в необходимом соотношении в шаровых мельницах или вибромельницах. После получения однородной массы производятся прессование брикетов и их обжиг. Эти операции применяются для частичной или полной ферритизации и для уменьшения усадки сердечника после прессовки. В дальнейшем брикеты дробятся на куски и размалываются. В результате образуется более однородная и измельченная шихта, которая поступает на формовку изделий. Для получения более однородной шихты помол часто проводится в жидкой среде (вода, бензин, толуол, бензол и др.). При изготовлении шихты особое значение имеет чистота окислов, которая оказывает сильное влияние на величину начальной проницаемости феррита. Установлено, что содержание в марганец-цинковом феррите до 0,2% примесей бария, натрия и лития снижает $\mu_н$ более чем в 3 раза.

Получение сердечников требуемой формы осуществляется путем прессовки шихты. Прессовка проводится при удельном давлении от 1 до 6 $Т/см^2$ гидравлическими или механическими прессами.

Для связки частиц ферритов до прессовки в шихту вводится парафин, поливиниловый спирт или какое-либо другое связующее вещество. Величина удельного давления выбирается в зависимости от свойств шихты и размеров сердечника. При этом учитывают, что с ростом давления уменьшается пористость (что хорошо сказывается при спекании изделий), но одновременно ухудшаются условия обмена кислородом между ферритом и внешней средой. В ряде случаев ферритовые сердечники сложной формы прессуются методом литья под давлением или вытачиваются из заготовок на токарных станках.

Термообработка ферритов является наиболее сложной и ответственной операцией. Термообработка брикетов производится ступенчато: до температуры 100—250° С происходит выпаривание связующего вещества, а с 300 до 600° С — реакция между частицами исходных окислов с образованием ферритов. Для никель-цинковых ферритов, например, полная ферритизация завершается при температуре 960° С. Ее результатом является образование твердых растворов окислов железа, никеля и цинка с заданными кристаллической структурой и расположением ионов металлов.

Для повышения проницаемости изделия подвергают дополнительному обжигу (спеканию). Температура спекания зависит от состава феррита и колеблется в пределах от 1 050 до 1 350° С. В результате такой термообработки образующиеся кристаллические решетки приобретают более совершенную структуру, увеличиваются размеры отдельных кристаллов, повышается однородность и уменьшается пористость ферритов. В результате смещения границ доменов под действием поля становятся более интенсивными и начальная проницаемость возрастает.

При спекании ферритов возможно выделение кислорода, сопровождаемое изменением состава ферритов и их структуры. Поэтому процесс обжига для соответствующих ферритов ведется при избыточном содержании кислорода.

На свойства ферритов оказывает значительное влияние также режим их охлаждения. В зависимости от скорости охлаждения изменяются величина внутренних напряжений, распределение ионов между подрешетками и размеры кристаллитов, что сильно отражается на электромагнитных параметрах сердечников.

О влиянии состава феррита и технологии его изготовления на его магнитные свойства можно судить по зависимости проницаемости никель-цинкового феррита от состава при различных скоростях охлаждения. Из графика на рис. 18 видно, что наибольшей проницаемостью обладает никель-цинковый феррит, полученный в условиях медленного охлаждения.

От состава зависят также точка Кюри и интервал рабочих температур, который для никель-цинкового феррита с начальной проницаемостью $\mu_н = 200 \div 2\,000$ равен 70—120° С. Для получения феррита с малыми потерями в диапазоне частот до 100 *Мгц* и соответственно меньшей проницаемостью (в пределах 10—100) уменьшают содержание цинка в феррите.

Петля гистерезиса тем у́же и коэрцитивная сила никель-цинковых ферритов тем меньше, чем выше проницаемость материала, которая, как упоминалось ранее, зависит в значительной мере от степени его спекания.

Подобно ферромагнетикам никель-цинковые ферриты характеризуются большой зависимостью проницаемости от напряженности

поля. Но при уменьшении величины проницаемости эта зависимость становится более слабой.

Существенным недостатком ферритов (в частности, никель-цинковых) по сравнению с магнитодиэлектриками является повышенная температурная нестабильность проницаемости. На рис. 19 приведены графики зависимости $\mu_н$ от температуры для ферритов различных составов и с различными значениями начальной проницаемости при комнатной температуре.

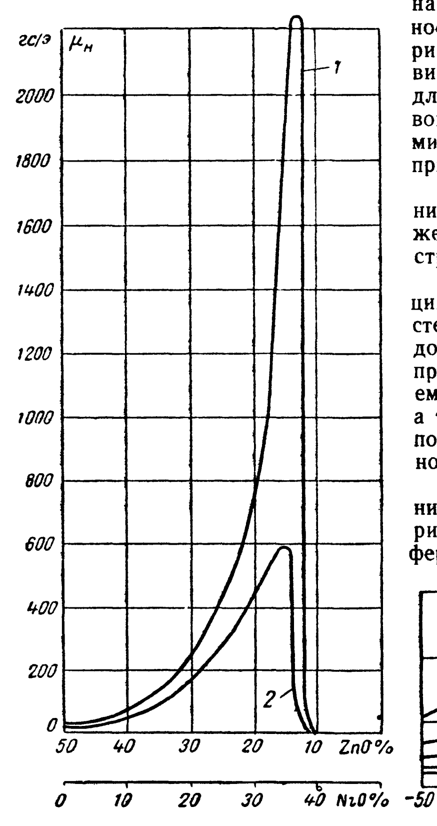


Рис. 18. Зависимость начальной проницаемости никель-цинкового феррита от его состава и условий охлаждения.

1 — медленное охлаждение; 2 — быстрое охлаждение.

Временная нестабильность никель-цинковых ферритов также велика и связана с их структурным старением.

Влагостойкость никель-цинковых ферритов зависит от степени их спекаемости; при достаточном обжиге за 48 *ч* пребывания в воде непроницаемость их изменяется до 2%, а тангенс угла потерь — до 5% по отношению к первоначальной величине.

Наиболее высоким значением проницаемости характеризуются марганец-цинковые ферриты. Магнитные свойства

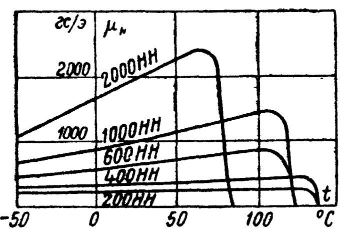


Рис. 19. Зависимость начальной проницаемости никель-цинковых ферритов от температуры.

этих ферритов также зависят от состава и технологии их изготовления. Большую роль играет правильный выбор шихты и среды, в которой производится обжиг изделий. Наибольшая стабильность состава феррита наблюдается при спекании его в атмосфере очищенного азота с небольшим содержанием кислорода при температуре 1 150—1 350° С. Охлаждение феррита для получения больших значений проницаемости должно производиться в условиях, исключающих окисление

марганца. Повышенное значение проницаемости и минимальные потери достигаются при медленном охлаждении в инертных газах или в вакууме с остаточным давлением воздуха 0,1—0,01 *мм рт. ст.*

Большое влияние на свойства ферритов оказывают примеси ионов щелочных и щелочноземельных металлов. Так, например, содержание 0,2—0,3% калия вызывает резкое снижение проницаемости, а наличие окиси кальция в количестве до 0,1—0,2% уменьшает потери с одновременным снижением проницаемости. Интервал ра-

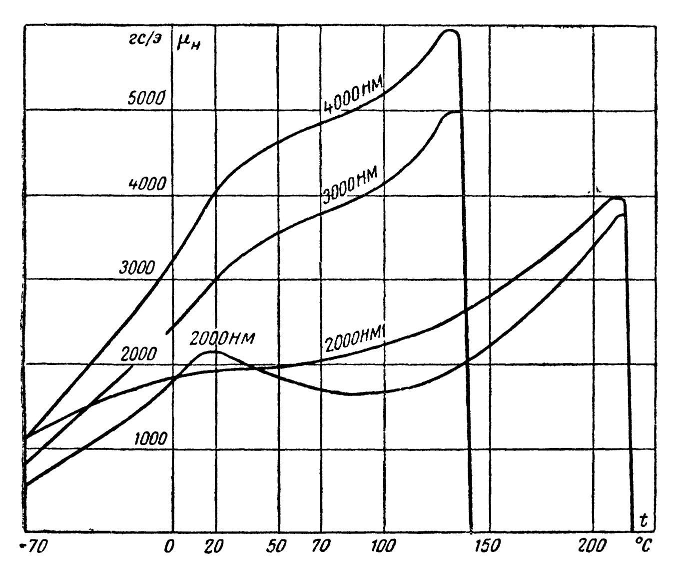


Рис. 20. Зависимость начальной проницаемости марганец-цинковых ферритов от температуры.

бочих температур марганец-цинковых ферритов выше по сравнению с никель-цинковыми, но зависимость проницаемости от температуры у первых имеет более сложный характер (рис. 20). Температурный коэффициент проницаемости очень чувствителен к составу марганец-цинковых ферритов и при небольших отклонениях от нормы может принимать то положительные, то отрицательные значения.

Временна́я стабильность марганец-цинковых ферритов примерно такая же, как у никель-цинковых.

Для использования на высоких частотах (до десятков и сотен мегагерц) в последнее время начинают находить применение полиферриты — медно-никель-цинковые и свинцово-никель-кобальтовые.

На магнитные свойства медно-никель-цинкового феррита большое влияние оказывает содержание окиси цинка. Чем меньше ее в этих полиферритах, тем ниже их проницаемость и выше предельная рабочая частота. Свинцово-никель-кобальтовый полиферрит характеризуется постоянством проницаемости в широком диапазоне частот, но его температурный коэффициент проницаемости, равный $(200 \div 400) \cdot 10^{-6}$ 1/° С, больше, чем у магнитодиэлектриков.

Ферриты в слабых полях высокой частоты

Электромагнитные свойства ферритов изучены в широком диапазоне частот (до 10^{11} *гц*). Для радиотехнических сердечников наибольший интерес представляет рассмотрение свойств ферритов в диапазоне частот 10^5—10^8 *гц*.

Характерной особенностью ферритов при работе в слабых полях высокой частоты являются падение проницаемости с ростом частоты и нелинейная частотная зависимость $\mathrm{tg}\,\delta_\mu$. Графики зависимости указанных параметров от частоты для никель-цинковых и марганец-цинковых ферритов, изображенные на рис. 21, подтверж-

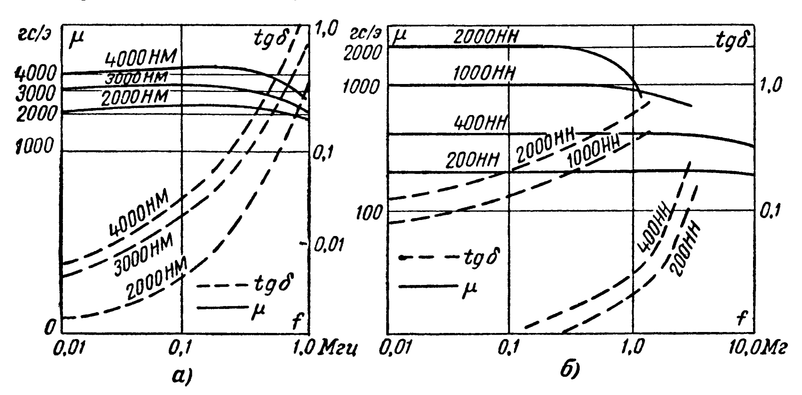


Рис. 21. Зависимость проницаемости и тангенса угла магнитных потерь марганец-цинковых (*а*) и никель-цинковых (*б*) ферритов от частоты.

дают сказанное. Видно, что чем больше величина проницаемости, тем резче ее спад с частотой и более значителен рост $\mathrm{tg}\,\delta_\mu$.

Наблюдаемые изменения μ и $\mathrm{tg}\,\delta_\mu$ в радиочастотном диапазоне объясняются двумя причинами. Первая из них, относящаяся к инфрарадиочастотной и началу радиочастотной области, связана с колебаниями границ доменов при воздействии переменного поля. Вторая причина, объясняющая изменения электромагнитных параметров в области более высоких частот, обусловлена резонансными процессами, возникающими при смещении границ доменов. Что касается возможного размагничивающего влияния вихревых токов, то опыты показали несущественную роль их в падении проницаемости и росте тангенса угла потерь с частотой. Вид частотной характеристики в значительной степени зависит от состава и структуры ферритов и содержания примесей.

Высокочастотные медно-никель-цинковые и свинцово-никелевые полиферриты способны работать при частотах до 1 000 *Мгц*. Но, как видно из рис. 22 и 23, при одинаковой с магнитодиэлектриками на основе карбонильного железа проницаемости они отличаются меньшей стабильностью электромагнитных параметров в зависимости от частоты.

Значительная зависимость проницаемости от напряженности поля в начальной области намагничивания и определяемая ею величина коэффициента амплитудной нестабильности $\alpha_н$ вызывают в переменных полях повышенные потери на гистерезис.

На рис. 24 изображены зависимости проницаемости и тангенса угла потерь от амплитуды переменного поля при частоте

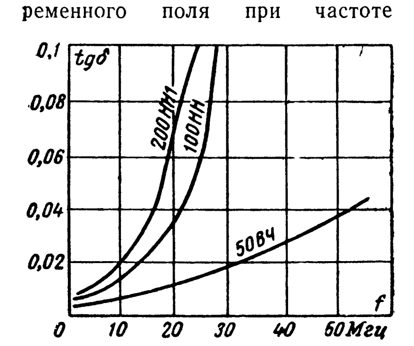


Рис. 22. Зависимость тангенса угла потерь медно-никелевых ферритов от частоты.

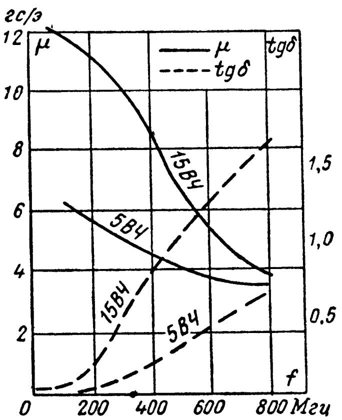
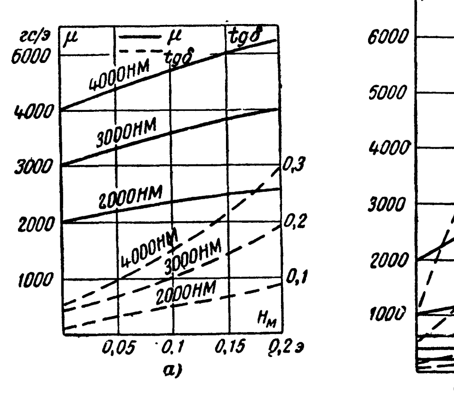


Рис. 23. Зависимость тангенса угла потерь и проницаемости свинцово-никелевых ферритов от частоты.

100 *кгц* для никель-цинковых и марганец-цинковых ферритов. Из графиков видно, что при одинаковом значении проницаемости наблюдается более сильная зависимость электромагнитных параметров



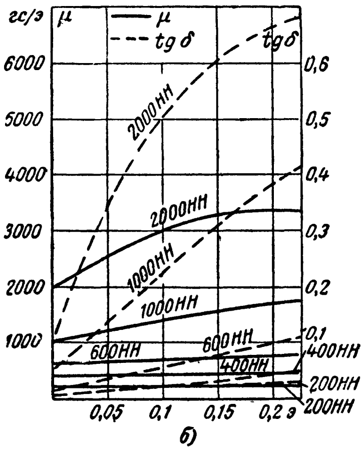


Рис. 24. Зависимости проницаемости и тангенса угла потерь марганец-цинковых (*а*) и никель-цинковых (*б*) ферритов от амплитуды переменного поля (при $f=100$ *кгц*).

никель-цинковых ферритов от напряженности поля по сравнению с марганец-цинковыми.

При воздействии на ферриты переменного поля возникает дополнительная нестабильность проницаемости (ползучесть). После прекращения воздействия переменного поля проницаемость ферритов в течение длительного времени восстанавливается до первоначального значения. При правильном выборе состава феррита можно свести ползучесть к минимуму.

В отличие от магнитодиэлектриков, потери в которых зависят только от частоты и напряженности переменного поля, в ферритах существует ряд дополнительных потерь, обусловленных размерами намагничиваемого тела. Эти потери вызваны вихревыми токами, объемным и магнитострикционным резонансом.

Магнитострикционный резонанс связан с механическими колебаниями ферритового сердечника и проявляется на определенной частоте всплеском частотной зависимости тангенса угла потерь. Резонансная частота не зависит от числа витков обмотки и напряженности поля, и с ростом температуры максимум $\operatorname{tg} \delta_\mu$ сдвигается вправо. В сильных полях магнитострикционные колебания могут вызвать даже разрушение образцов.

Резонансная частота может быть рассчитана по следующей формуле:

$$f_p = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{E}{D}} \sqrt{1 + n_p^2}, \qquad (48)$$

где D — плотность образца;
E — модуль Юнга;
n_p — число волн, укладывающихся по длине кольцевого сердечника;
r — средний радиус кольцевого сердечника.

Два остальных вида потерь зависят от диэлектрических свойств ферритов — удельного объемного сопротивления, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Ферриты являются полупроводниками и обладают электронной проводимостью. Величина их удельного сопротивления лежит в пределах от $5 \cdot 10^{-3}$ до 10^{10} *ом·см*. Удельное сопротивление ферритов зависит от их состава и температуры окружающей среды. Температурная зависимость удельного сопротивления носит экспоненциальный характер. При данной температуре величина ρ определяется значением энергии активации, которая для ферритов находится в пределах 0,1—0,6 *эв*.

Выражение для температурной зависимости удельного сопротивления имеет следующий вид:

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{E_p}{kT}}, \qquad (49)$$

где ρ_0 — значение удельного сопротивления, полученное при первоначальной температуре;
E_p — энергия активации;
k — постоянная Больцмана;
T — абсолютная температура.

Сопротивление ферритов в сильной мере зависит от их состава, в частности от содержания двухвалентных ионов железа. Влияние

состава никель-цинкового феррита (в молярных процентах) на величину ρ и $E_р$ хорошо иллюстрируется рис. 25.

Проводимость ферритов объясняют переходом валентных электронов от одного иона полупроводника к другому. Например, электрон двухвалентного иона железа (или марганца) может перейти к трехвалентному иону железа и при наложении электрического поля этот процесс приобретает направленный характер электронной проводимости.

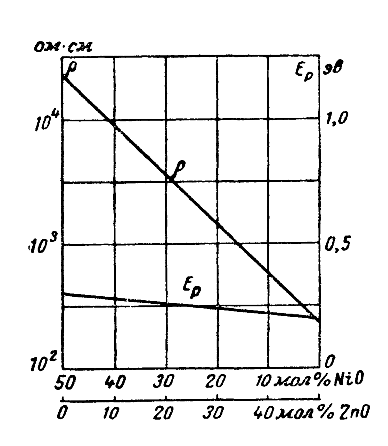


Рис. 25. Зависимости удельного сопротивления ρ и энергии активации $E_р$ от состава никель-цинкового феррита.

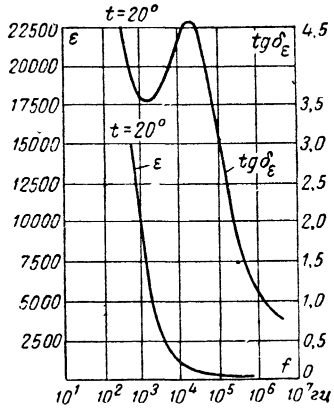


Рис. 26. Зависимости диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta_\varepsilon$ никель-цинкового феррита от частоты.

Диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta_\varepsilon$ также зависят от указанных выше факторов и меняются с частотой и температурой. На рис. 26 изображены графики частотной зависимости ε и $\mathrm{tg}\,\delta_\varepsilon$ никель-цинкового феррита при комнатной температуре. Вид кривых показывает, что диэлектрическая проницаемость резко падает с частотой, а тангенс угла диэлектрических потерь имеет максимум. С увеличением температуры максимум $\mathrm{tg}\,\delta_\varepsilon$ и значения ε сдвигаются вправо, в область более высоких частот.

Наличие диэлектрических свойств у ферритов, их частотная и температурная зависимости определяются процессами поляризации, возникающими в результате перехода валентных электронов от менее положительно заряженного двухвалентного иона (Fe^{++}) к более положительно заряженному трехвалентному иону (Fe^{+++}). Если период перехода электрона больше $^1/_2$ периода приложенного напряжения, то поляризация ослабляется, а это в свою очередь вызывает снижение проницаемости. Величина тангенса угла диэлектрических потерь и его максимум в основном определяются величиной тока сквозной проводимости и значением диэлектрической проница-

емости для соответствующей частоты. Частотная зависимость $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$ описывается формулой

$$\operatorname{tg}\delta_\varepsilon = \frac{1,8\cdot 10^{12}}{f\varepsilon\rho}. \qquad (50)$$

В этой формуле имеются две переменные величины — частота f и диэлектрическая проницаемость ε. С ростом f ε падает более резко, чем повышается f и $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$ увеличивается, достигая максимальной величины при частоте, соответствующей $\varepsilon=\varepsilon_{мин}$. Дальнейшее повышение частоты не вызывает практически изменения ε, и тангенс угла диэлектрических потерь с частотой уменьшается.

Полученное представление о диэлектрических свойствах ферритов позволяет перейти к рассмотрению потерь, вызванных вихревыми токами и объемным резонансом, связанных с геометрическими размерами тела.

Низкопроницаемые ферриты с $\mu_н=100\div500$ имеют удельное сопротивление $\rho=10^6\div10^8$ *ом·см*. В этом случае потери на вихревые токи очень малы и ими можно пренебречь. В случае высокопроницаемых марганец-цинковых ферритов с $\mu_н=4\,000\div7\,000$, которые имеют удельное сопротивление $\rho=5\div50$ *ом·см*, вихревыми токами уже пренебрегать нельзя.

Потери, вызываемые объемным резонансом, зависят от величин диэлектрической и магнитной проницаемости. Так как длина волны в феррите λ в зависимости от μ и ε меньше, чем в вакууме (λ_0):

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \qquad (51)$$

то при соответствующей частоте длина волны и размеры сердечника становятся соизмеримыми и в нем образуются стоячие волны и резонансные явления, сопровождающиеся увеличением потерь. С увеличением объема тела и значений ε и μ частота, при которой наблюдается объемный резонанс, уменьшается. Для сердечников из марганец-цинковых ферритов с размерами в десятки сантиметров объемный резонанс возникает при частоте в сотни килогерц. Для сердечников из никель-цинковых ферритов объемный резонанс наступает при более высоких частотах, так как диэлектрическая проницаемость у этого состава ферритов с увеличением частоты падает значительно резче.

Таким образом, при воздействии на феррит переменного поля в нем возникают потери, определяемые следующими явлениями: гистерезисом, колебательными и резонансными процессами при смещении границ доменов, вихревыми токами, объемным и магнитострикционным резонансом и в зависимости от электромагнитных параметров феррита, размеров сердечника, напряженности и частоты поля преобладающее значение приобретает тот или иной вид потерь.

Марки ферритов и их назначение

В зависимости от назначения магнитномягкие ферриты выпускаются двух классов. К первому классу относятся марганец-цинковые ферриты, предназначенные в основном для работы на часто-

Таблица 5

Электромагнитные параметры марганец-цинковых ферритов

Марка феррита	Начальная магнитная проницаемость $\mu_н$, *гс/э*	Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости $\alpha_\mu \cdot 10^6$ в интервале температур, °С	Относительный тангенс угла потерь $\frac{tg\,\delta}{\mu_н} \cdot 10^6$. Условия измерений: $H_м$ = 10 *мэ*	$H_м$ = 100 *мэ*	*f*, *Мгц*
6000 НМ	$6\,000^{+200}_{-1\,200}$	От —0,3 до —2,2 (от —60 до +100)	40	60	0,02
4000 НМ	$4\,000^{+800}_{-500}$	2,5* (от —60 до +125)	35	60	0,1
3000 НМ	$3\,000\pm500$	3* (от —60 до +125)	25	60	0,1
2000 НМ	$2\,000^{+500}_{-300}$	±5* (от —60 до +125)	15	45	0,1
2000 НМ1	$2\,000^{+500}_{-500}$	От —0,1 до +0,8 (от +20 до +50) От 0 до 1,0 (от —10 до +20) От —0,1 до +1,0 (от +20 до +70)	15	45	0,1
1500 НМ1	$1\,500^{+200}_{-300}$	0,8 (от +20 до +70) 0,6 (от +20 до +50) 0,8 (от —10 до +20)	15	45	0,1
1500 НМ3	$1\,500\pm300$	От 0 до 0,7 (от +20 до +70) От 0 до 1,5 (от +20 до +155) От 0 до 1,5 (от —60 до +20)	5	15	0,1
1000 НМ3	$1\,000\pm200$	От 0 до 1,0 (от +20 до +70) От 0 до 1,2 (от +20 до +125) От 0 до 1,2 (от —60 до +20)	5	15	0,1

Марка феррита	Начальная магнитная проницаемость $\mu_н$, *гс/э*	Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости $\alpha_\mu \cdot 10^6$ в интервале температур, °С	Относительный тангенс угла потерь $\frac{tg\,\delta}{\mu_н} 10^6$. Условия измерений: $H_м$ = =10 *мэ*	$H_м$ = =100 *мэ*	*f*, *Мгц*
700 НМ	700±150	От —0,2 до +0,7 (от +20 до +155) От 0 до 1,2 (от —60 до +20)	60	—	3

Примечания 1. Относительный температурный коэффициент $\alpha_\mu = \Delta\mu_н/\mu_н^2\Delta t$.

2. Величины, отмеченные *, носят справочный характер.

тах до 1—3 *Мгц*. Ко второму классу относятся никель-цинковые и ряд полиферритов (медно-никель-цинковые, свинцово-никелевые и др.), предназначенные для работы в диапазоне частот от 0,1 до 300 *Мгц*.

Марганец-цинковые ферриты имеют ряд марок, свойства которых приведены в табл. 5.

В обозначениях марок ферритов цифры характеризуют величину начальной проницаемости, буква «Н» — низкочастотную область применения и буква «М» — принадлежность к марганец-цинковым ферритам.

Характерными свойствами марганец-цинковых ферритов являются высокое значение начальной проницаемости, низкая величина остаточной индукции, достаточно высокое значение индукции насыщения (25—0,5 *тл*) и по сравнению с другими ферритами более высокий интервал рабочих температур.

Указанные свойства определяют область применения марганец-цинковых ферритов: изготовление импульсных трансформаторов и сердечников катушек индуктивности проводной и радиоаппаратуры. Использование этих материалов в импульсных трансформаторах вызвано повышенным значением пульсационной проницаемости, определяемой соотношением между B_s и B_r. Катушки индуктивности проводной аппаратуры с марганец-цинковыми ферритовыми сердечниками тороидальной или броневой формы с зазорами могут обладать добротностью до 800 в диапазоне частот 40—120 *кгц*.

Параметры никель-цинковых ферритов и полиферритов приведены в табл. 6.

Для этих ферритов цифры перед буквами также означают номинальное значение начальной проницаемости, первая буква «Н» — низкочастотная область применения, вторая буква «Н» — принадлежность к никель-цинковым ферритам, буквы «ВЧ» — высокочастотная область применения, а цифры после букв — особые свойства материала.

Таблица 6

Электромагнитные параметры никель-цинковых ферритов и полиферритов

Марка феррита	Начальная магнитная проницаемость, $\mu_н$, *гс/э*	Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости, $\alpha_\mu \cdot 10^6$ в интервале температур, °С	Относительный тангенс угла потерь $\frac{tg\,\delta}{\mu_н} \cdot 10^6$. Условия измерений: $H_м$ = 10 *мэ*	$H_м$ = 100 *мэ*	*f, Мгц*
2000 НН	$2\,000^{+400}_{-200}$	От 3 до 9** (от —60 до +50)	100	300	0,1
1000 НН	1 000±200	От 5 до 15* (от —60 до +85)	85	200	0,1
600 НН	600^{+200}_{-100}	От 6 до 15* (от —60 до +100)	25	125	0,1
400 НН	400^{+100}_{-50}	От 5 до 15* (от —60 до +100)	20	50	0,1
300 НН	300^{+50}_{-20}	15* (от +20 до +100) 30* (от —60 до +20)	35	—	1
200 НН	200^{+50}_{-70}	От 4 до 10* (от —60 до +100)	30	65	0,1
200 НН2	200^{+30}_{-10}	30* (от —60 до +100)	50	—	3
150 ВЧ	150±10	±4 (от —10 до +50)	135	—	12
100 ВЧ	100±20	—	135	—	18
100 НН	100^{+30}_{-10}	40* (от +20 до +100) 300* (от —60 до +20)	125	—	7
60 НН	60^{+5}_{-10}	60* (от +20 до +100) 130* (от —60 до +20)	165	—	15
50 ВЧ2	50^{+15}_{-5}	От —3 до +10 (от —60 до +125)	125	—	10
30 ВЧ2	30±5	±35 (От 20 до +125)	85	—	5

Продолжение табл. 6

Марка феррита	Начальная магнитная проницаемость, $\mu_н$, *гс/э*	Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости, $\alpha_\mu \cdot 10^6$ в интервале температур, °C	Относительный тангенс угла потерь $\frac{tg\,\delta}{\mu_н} \cdot 10^6$. Условия измерений: $H_м$=10 *мэ*	$H_м$=100 *мэ*	*f, Мгц*
20 ВЧ	20^{+8}_{-2}	±5 (от +20 до +125) ±10 (от —60 до +20)	250	—	5
10 ВЧ1	$10^{+4}_{-1,5}$	180* (от +20 до +100) 750* (от —60 до +20)	1 350	—	150
5 ВЧ	5±0,5	60 (от +20 до +100)	1 250	—	100

Примечания: 1. Относительный температурный коэффициент $\alpha_\mu = \Delta\mu/\mu_н^2\Delta t$.

2. Величины, отмеченные *, носят справочный характер.

Таблица 7

Параметры марганец-цинковых и никель-цинковых ферритов

Ферриты	Марка	Начальная магнитная проницаемость, $\mu_н$, *гс/э*	Относительный коэффициент потерь на гистерезис $\frac{\delta_г}{\mu_н^2} \cdot 10^6$	Граничная частота, *Мгц*, при tg δ=0,1	tg δ=0,02	Относительный температурный коэффициент начальной проницаемости $\frac{TK\mu_н}{\mu_н} \cdot 10^6$,1/°С, в интервале температур 20—70° С	Точка Кюри, °С (не ниже)
Марганец-цинковые	2000 НМ	2 000	0,17	0,45	0,08	От —2 до +4,5	200
	2000 НМ1	2 000	0,17	0,45	0,08	От —0,1 до +1,0	200
	1000 НМ	1 000	0,37	1,0	0,5	От —0,5 до +0,5	200
	1000 НМ3	1 000	0,11	2,2	1,0	От 0 до +1,0	200
	700 НМ	700	0,04	5,0	3,0	От —0,2 до +0,7	240
Никель-цинковые	2000 НН	2 000	1,1	0,02	—	От +3 до +9	70
	1000 НН	1 000	1,3	0,4	—	От +5 до +15	110
	600 НН	600	2,0	1,2	0,2	От +5 до +15	110

В табл. 7 приводится сравнение свойств никель-цинковых и марганец-цинковых ферритов с одинаковой величиной начальной проницаемости.

Из приведенных сравнительных данных видно, что при одинаковом значении проницаемости марганец-цинковые ферриты отличаются меньшими потерями на гистерезис, более высокой критической частотой и температурой Кюри и меньшим относительным температурным коэффициентом проницаемости. Поэтому на частотах до 1 *Мгц* наибольшее применение находят марганец-цинковые ферриты. Но в области более высоких частот никель-цинковые ферриты обладают лучшими частотными характеристиками. При частотах порядка десятков и сотен мегагерц никель-цинковые ферриты при соответствующих добавках могут конкурировать с магнитодиэлектриками.

Сравнительная оценка электромагнитных параметров низкопроницаемых никель-цинковых ферритов и магнитодиэлектриков (табл. 8) показывает, что отличительным преимуществом высоко-

Таблица 8

Свойства высокочастотных магнитных материалов

Материал	$\mu_н$	ТК $\mu_н \cdot 10^6$, 1/°С, в интервале температур от —60 до +100°С	$tg\,\delta_\mu \cdot 10^3$ при $H=$ =10 *мэ*	На частоте, *Мгц*
Феррит 20ВЧ	20^{+8}_{-2}	±100*	44	5
Магнитодиэлектрик из карбонильного железа ВКЖ . .	25^{+2}_{-2}	260	55	5
Магнитодиэлектрик из альсифера ФИ	20—24	±150	150	5
Феррит 10ВЧ1	$10^{+4}_{-1,5}$	1 500—7 500	9	10
Магнитодиэлектрик из карбонильного железа Р-10	12±1	180	40	10
Магнитодиэлектрик из карбонильного железа Р-20	11±1	100	25	10
Магнитодиэлектрик из карбонильного железа Пс.	12±1	50	20	20
Магнитодиэлектрик из карбонильного железа Р-100 . . .	10^{+05}_{-1}	100	50	100
Магнитодиэлектрик из карбонильного железа Пс	11±1	50	75	100
Магнитодиэлектрик из альсифера РЧ-9	9±1	— 100	300	100
Феррит 5ВЧ	5±0,5	300**	6	100
Магнитодиэлектрик из альсифера РЧ-6	6±0,5	—100	200	100

* Значение ТК $\mu_н$ измерялось в интервале температур от —40 до +125° С.

** Значение ТК$\mu_н$ измерялось в интервале температур от +20 до +100° С.

частотных ферритов является низкое значение тангенса угла магнитных потерь в широком диапазоне частот. Что касается температурной стабильности, то явное преимущество остается за магнитодиэлектриками на основе карбонильного железа марок Р-10, Р-20, Р-100, П и $П_с$. При этом следует помнить о меньшей амплитудной стабильности ферритов по сравнению с магнитодиэлектриками, которая в некоторых случаях может играть решающее значение при выборе материала.

Магнитодиэлектрики на основе альсифера марок ФИ, РЧ-9 и РЧ-6 в среднем обладают более низкими электромагнитными параметрами, чем на основе карбонильного железа, и их применение определяется в основном экономической целесообразностью и необходимостью получения сердечников с заданным температурным коэффициентом магнитной проницаемости.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТНЫЕ СЕРДЕЧНИКИ В РАДИОСХЕМАХ

Требования, предъявляемые к магнитным сердечникам, и выбор материала с оптимальными свойствами

В радиотехнике высокочастотные магнитные сердечники получили наибольшее распространение для изготовления высокодоброгных и малогабаритных катушек индуктивности, эксплуатируемых в широком диапазоне частот (от 100 *кгц* до 100 *Мгц*).

Качество контура определяется шириной полосы пропускания (остротой настройки на резонанс), которая, как видно из рис. 27, зависит от величины затухания d. Этот параметр является суммой двух составляющих: тангенса угла потерь в катушке индуктивности и тангенса угла диэлектрических потерь в конденсаторе:

$$d = d_L + d_C = \frac{R}{\omega L} + \operatorname{tg} \delta_\varepsilon . \qquad (52)$$

При этом полоса пропускания контура пропорциональна затуханию, т. е.

$$\Delta f = f_{рез} d. \qquad (53)$$

Рис. 27. Полоса пропускания колебательного контура.

Приведенные выражения показывают, что затухание d и полоса пропускания Δf зависят от добротности катушки индуктивности, равной величине, обратной тангенсу угла потерь, который в свою очередь зависит от электромагнитных параметров сердечника,

Применение магнитных сердечников, вводимых внутрь катушек, позволяет повысить их индуктивность и при малом значении потерь увеличить значение их добротности. Высокопроницаемые сердечники, особенно с замкнутым магнитопроводом, создают возможность уменьшить габариты катушек индуктивности. Наличие сердечника, кроме того, позволяет менять индуктивность катушки в широких пределах для настройки контура без изменения числа витков.

Требования к магнитным сердечникам и выбор соответствующего материала для них определяются типом катушки индуктивности и условиями ее работы.

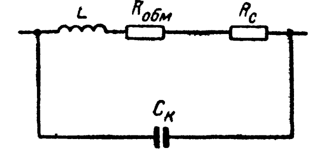


Рис. 28. Эквивалентная схема катушки индуктивности с собственной емкостью.

Свойства катушек индуктивности определяются следующими основными параметрами: индуктивностью L, добротностью Q, собственной емкостью $C_к$ и температурным коэффициентом индуктивности ТКИ.



Индуктивность катушки с магнитным сердечником $L_с$ зависит от величины магнитной проницаемости сердечника $\mu_{эфф}$, которая называется эффективной проницаемостью, если форма сердечника отличается от тороидальной:

$$L_с = L\,\mu_{эфф}, \qquad (54)$$

где L — индуктивность катушки без сердечника.

Из приведенной формулы видно, что эффективная проницаемость $\mu_{эфф}$ показывает, во сколько раз индуктивность катушки с сердечником больше индуктивности катушки без сердечника.

Добротность катушки индуктивности с сердечником равна:

$$Q_с = \frac{\omega\mu_с L}{R_{об} + R_с} = \frac{\omega L}{R_{об}}\,\frac{\mu_с}{1 + \frac{R_с}{R_{об}}} = Q\,\frac{\mu_с}{1 + \frac{R_с}{R_{об}}}, \qquad (55)$$

где Q — добротность катушки без сердечника;
L — индуктивность катушки без сердечника;
$R_{об}$ — сопротивление потерь в обмотке;
$R_с$ — сопротивление потерь в сердечнике.

В зависимости от характера изменений $\mu_с$ и $R_с$ с изменением частоты и соотношения между $R_с$ и $R_{об}$ добротность катушки с сердечником принимает соответствующие значения. При $\frac{\mu_с}{1 + \frac{R_с}{R_{об}}} > 1$ сердечник увеличивает добротность катушки.

Собственная емкость катушки индуктивности с сердечником сложным образом складывается из межвитковой емкости и емкости между витками и сердечником. Она может быть заменена эквивалентной емкостью, подключенной к началу и концу обмотки (рис. 28), называемой собственной емкостью катушки $C_к$.

Температурный коэффициент индуктивности, определяющий обратимые температурные изменения индуктивности катушки, зависит от размеров каркаса, обмотки, расстояния между витками и вели-

чины магнитной проницаемости сердечника при воздействии температуры:

$$ТКИ_с = \frac{\Delta L_с}{L_с \Delta t} = ТКИ + ТК \mu_{эфф}, \qquad (56)$$

где ТКИ — температурный коэффициент индуктивности катушки без сердечника;

$ТК\mu_{эфф}$ — температурный коэффициент магнитной проницаемости сердечника.

Кроме перечисленных параметров, свойства катушек индуктивности определяются интервалом рабочих температур, допустимой относительной влажностью и другими внешними факторами, при которых изменение их параметров не выходит за пределы задаваемых величин. В некоторых случаях большое значение приобретают вес и габариты катушки, которые определяются электромагнитными параметрами сердечников.

В радиочастотном диапазоне индуктивности с высокочастотными сердечниками широко используются в качестве катушек контуров и фильтров с постоянной и переменной индуктивностью, высокочастотных дросселей, магнитных антенн, вариометров и пр.

Контурные катушки для всего радиочастотного диапазона должны иметь наибольшую стабильность параметров при воздействии температуры и других внешних факторов. Так, например, катушки гетеродинных контуров должны обладать в зависимости от диапазона частот величиной $ТКИ_с$ от $(10 \div 20) \cdot 10^{-6}$ 1/° С до $(150 \div 300) \cdot 10^{-6}$ 1/° С. Для ряда устройств эти требования должны выполняться в широком интервале температур (от —60 до +100° С). Значения температурного коэффициента индуктивности для катушек гетеродинных контуров различного назначения приводятся в табл. 9.

Таблица 9

Значения ТКИ катушек индуктивности гетеродинных контуров

Тип намотки и материал каркаса	ТКИ, 1/°С	Возможные области применения катушек
Однослойная осажденная намотка на керамическом каркасе	$(10 \div 20) \cdot 10^{-6}$	Гетеродин очень высокой стабильности в КВ приемниках
Однослойная «горячая» намотка на керамическом каркасе	$(30 \div 50) \cdot 10^{-6}$	Гетеродины высокой стабильности в КВ приемниках
Сплошная однослойная намотка на керамическом каркасе	$(50 \div 100) \cdot 10^{-6}$	Гетеродины повышенной стабильности в приемниках средних и коротких волн
Сплошная однослойная намотка на каркасе из пластмассы	$(100 \div 200) \cdot 10^{-6}$	Гетеродины низкой стабильности и контуры ВЧ в приемниках средних и коротких волн
Многослойная универсальная намотка	$(150 \div 300) \cdot 10^{-6}$	То же для средних и длинных волн

Наряду с этим требуется также высокая временнáя стабильность индуктивности. Допускаются изменения L не более чем на 0,1—0,2% за год.

На основании сопоставления приведенных данных с электромагнитными параметрами высокочастотных магнитных материалов (см. табл. 8) можно сделать вывод о целесообразности применения порошков карбонильного железа для изготовления сердечников контурных катушек. При этом для диапазона ДВ следует применять сердечники на основе порошка ВКЖ, для диапазона СВ — на основе Р-10, для диапазона КВ — на основе Р-20 и для диапазона УКВ — на основе Р-100. Для гетеродинных катушек коротковолновых приемников, отвечающих очень высоким требованиям по температурной стабильности, желательно использовать сердечники на основе карбонильного железа марки $П_с$.

В диапазоне ДВ целесообразно также использовать высокопроницаемые ферритовые сердечники с немагнитным зазором. Наиболее рациональной формой их является форма броневых сердечников с зазором во внутреннем керне. Величина зазора выбирается из требований температурной стабильности.

Высокочастотные дроссельные катушки индуктивности выполняют заградительные функции для токов высокой частоты. Качество дросселя определяется максимально возможным значением его индуктивности и минимальной величиной собственной емкости. Исходя из этих требований, наиболее целесообразно для дроссельных катушек применять магнитные сердечники из никель-цинкового феррита с различными величинами электромагнитных параметров в зависимости от частотного диапазона. Для длинноволнового диапазона желательно применять сердечники из высокопроницаемого феррита 600НН, для средневолнового — из ферритов 100НН и 60НН, для коротковолнового — из феррита 20ВЧ и для ультракоротковолнового — из феррита 10ВЧ1 или на основе карбонильного железа марки Р-100.

Вариометры, или катушки с переменной индуктивностью, применяются для перестройки или подстройки контуров в широком диапазоне частот. Свойства вариометров определяются величиной коэффициента перекрытия по индуктивности K_L, который равен отношению максимального значения индуктивности $L_{макс}$ к минимальному значению индуктивности $L_{мин}$:

$$K_L = \frac{L_{макс}}{L_{мин}}. \qquad (57)$$

Для получения наибольшего значения K_L следует применять магнитные сердечники из высокопроницаемых ферритов.

Эффективность антенных катушек определяется их пространственной избирательностью и компактностью. С этой точки зрения целесообразно применение никель-цинковых ферритов с проницаемостью от 2 000 до 600 в диапазоне длинных волн, от 400 до 600 в диапазоне средних волн, от 100 до 400 в диапазоне коротких волн и от 10 до 50 в диапазоне ультракоротких волн. Очевидно, для последнего частотного диапазона могут найти применение антенные сердечники на основе карбонильного железа марок Р-20 и Р-100.

Конструкция и электромагнитные параметры высокочастотных сердечников

Высокочастотные сердечники, используемые в радиоаппаратуре, по конструкции делятся на две основные группы: цилиндрические и броневые. Электромагнитные параметры сердечников одинаковой конструкции определяются свойствами магнитного материала и условиями работы.

Карбонильные сердечники цилиндрической и броневой конструкции на основе порошкового карбонильного железа в зависимости от назначения выпускаются следующих типов:

СЦР — сердечники цилиндрические резьбовые (рис. 29, *а*);

СЦГ — сердечники цилиндрические гладкие (рис. 29, *б*);

СЦТ — сердечники цилиндрические трубчатые (рис. 29, *в*);

СБ-а — сердечники броневые с замкнутой магнитной цепью (рис. 30, *а*);

СБ-б — сердечники броневые с разомкнутой магнитной цепью (рис. 30, *б*).

Сердечники цилиндрические резьбовые имеют восемь, а гладкие и трубчатые — по два типоразмера (табл. 10).

Таблица 10

Типоразмеры цилиндрических сердечников

Типоразмер сердечника	Размеры, *мм* (рис. 29)					Вес не более, *г*
	d	l	a	b	d_0	
СЦР-1	M6×0,75	10	1,2	3,5	4,5	1,0
СЦР-2	M6×0,75	19	1,2	3,5	4,5	2,0
СЦР-3	M7×0,75	10	1,2	3,5	4,5	1,5
СЦР-4	M7×0,75	19	1,2	3,5	5,5	3,0
СЦР-5	M8×1,0	10	1,5	5,0	6,5	1,8
СЦР-6	M8×1,0	19	1,5	5,0	6,5	3,5
СЦР-7	M9×1,0	10	1,5	5,0	7,5	2,5
СЦР-8	M9×1,0	19	1,5	5,0	7,5	4,5
СЦГ-1	—	10	—	—	—	4
СЦГ-2	—	19	—	—	—	7,5
СЦТ-1	—	10	—	—	—	3,7
СЦТ-2	—	19	—	—	—	7,0

Сердечники типа СЦР используются в основном в однослойных катушках индуктивности для настройки контуров. Настройка осуществляется путем изменения индуктивности в процессе перемещения сердечника по резьбе каркаса.

Сердечники типов СЦГ и СЦТ применяются для увеличения индуктивности катушек, не требующих настройки, и закрепляются неподвижно в каркасах.

Относительная добротность $Q_{отн}$ и эффективная проницаемость $\mu_{эфф}$ сердечников из карбонильного железа приведены в табл. 11. Здесь под относительной добротностью подразумевается отноше-

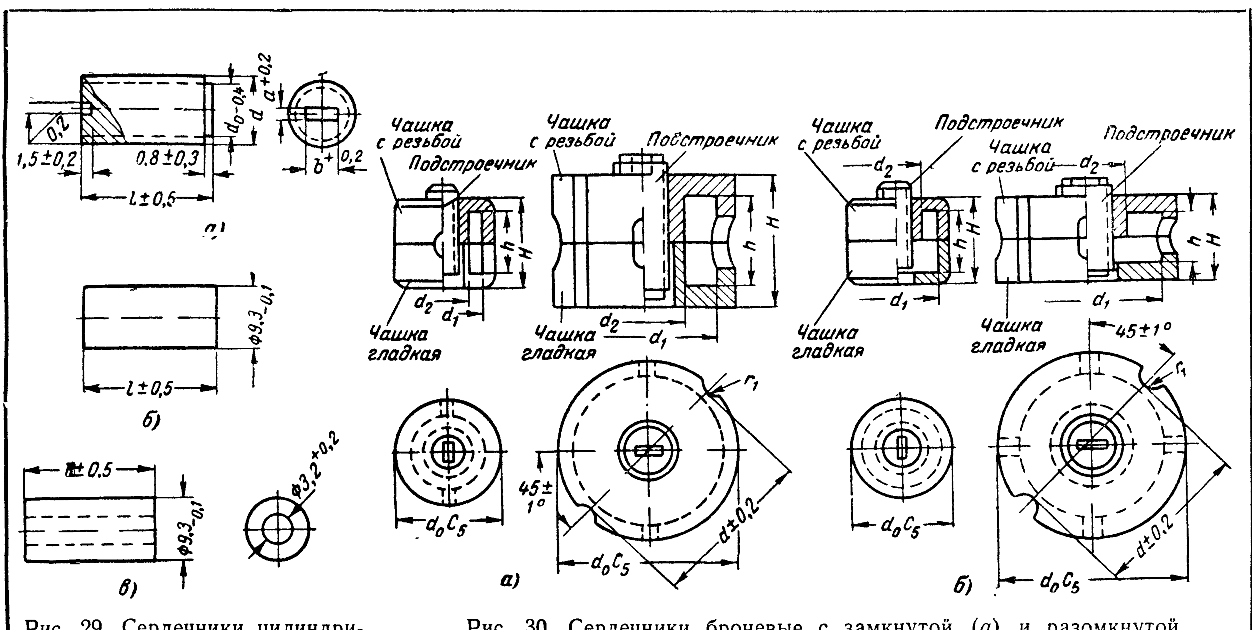


Рис. 29. Сердечники цилиндрические резьбовые (*а*), гладкие (*б*) и трубчатые (*в*).

Рис. 30. Сердечники броневые с замкнутой (*а*) и разомкнутой (*б*) магнитной цепью.

ние добротности катушки с сердечником $Q_с$ к добротности катушки без сердечника Q:

$$Q_{отн} = \frac{Q_с}{Q}, \qquad (58)$$

а под эффективной магнитной проницаемостью — отношение индуктивности катушки с сердечником $L_с$ к индуктивности катушки без сердечника L:

$$\mu_{эфф} = \frac{L_с}{L}. \qquad (59)$$

Таблица 11

Электромагнитные параметры сердечников из карбонильного железа

Типоразмер сердечника	f, Мгц	$Q_{отн}$ (не меньше)	$\mu_{эфф}$ (не меньше)	Типоразмер сердечника	f, Мгц	$Q_{отн}$ (не меньше)	$\mu_{эфф}$ (не меньше)
СЦР-1	15	0,9	1,5	СБ-0а	3	1,0	1,6
СЦР-2		1,0	1,6	СБ-1а	0,5	2,0	3,0
СЦР-3		0,9	1,5	СБ-1б		1,0	1,7
СЦР-4		1	1,6	СБ-2а	0,85	1,4	2,8
СЦР-5		0,9	1,5	СБ-2б		1,0	1,8
СЦР-6		1,0	1,6	СБ-3а	1,0	1,2	3,4
СЦР-7		0,9	1,5	СБ-4а		1,0	3,7
СЦР-8		1,0	1,6	СБ-5а		1,0	3,4
СЦГ-1	6	1,2	1,9				
СЦГ-2		1,3	2,0				
СЦТ-1		1,2	1,9				
СЦТ-2		1,3	2,0				

Примечания 1. Параметры броневых сердечников даны без учета параметров подстроечников.

2. Коэффициент подстройки при полностью введенном подстроечнике $k \geqslant 13\%$.

3. Для сердечника СБ-0а параметры соответствуют одной чашке. При полном введении подстроечника на глубину резьбовой чашки коэффициент перекрытия $\geqslant 5\%$.

Из приведенных табличных данных видно, что при частоте 6 *Мгц* введение в катушку цилиндрических сердечников увеличивает ее добротность, а при частоте 15 *Мгц* в некоторых случаях уменьшает. Вероятно, для этой частоты требуется при изготовлении сердечников применять более высокодисперсное карбонильное железо.

В отличие от цилиндрических сердечников броневые благодаря их конфигурации обеспечивают прохождение магнитных силовых линий в основном через материал и характеризуются большей величиной эффективной проницаемости. Из двух типов броневых сер-

дечников СБ-а и СБ-б последний имеет меньшую проницаемость, так как его конструкция выполнена с разомкнутым магнитопроводом. Меньшая величина проницаемости сердечников СБ-б определяет бо́льшую величину коэффициента подстройки индуктивности.

Как видно из табл. 11, броневые сердечники с замкнутым магнитопроводом выпускаются шести, а с разомкнутым магнитопроводом — двух типоразмеров. Размеры броневых сердечников приведены в табл. 12.

Таблица 12

Размеры броневых сердечников

Типоразмеры сердечника	Размеры, *мм* (рис. 30)							Вес сердечника в комплекте (не более), *г*
	d_0	d_1	d_2	d	H	h	r_1	
СБ-0а	9,6	7,5	4,6	—	7,2	4,2	—	2,2
СБ-1а	12,3	10	6	—	10,6	8,4	—	5
СБ-2а	23	18,5	10	21	11	6,2	1	20
СБ-3а	23	18	11	21	17	12	1	30
СБ-4а	28	22	13	26	23	17	1	45
СБ-5а	34	27	13,5	30,8	28	20,4	1,6	80

Благодаря большей по сравнению с цилиндрическими сердечниками проницаемости броневые сердечники позволяют уменьшить габариты контурных катушек индуктивности. Однако частотные потери, возникающие в материале, ограничивают применение их в основном до 20 *Мгц*. Использование высокодисперсного карбонильного железа марки Р-100, как показали опыты, позволяет расширить частотный диапазон сердечников типа СБ-0 до частоты более 50 *Мгц*.

Карбонильные сердечники, изготовленные с применением двойной изоляции (0,2—0,3% жидкого стекла и 4—5% бакелитовой смолы), способны длительно работать в интервале температур от —60 до +100° С. Катушки индуктивности с карбонильными сердечниками в герметичном исполнении обладают относительно низким значением $ТКИ_с = (100 \div 150) \cdot 10^{-6}$ 1/° С, а их нестабильность индуктивности за год работы не превышает 0,2% первоначальной величины.

Высококачественные сердечники на основе ферритов выпускаются кольцевой, цилиндрической, броневой, пластинчатой и Ш-образной форм (рис. 31).

Сердечники цилиндрической формы (гладкие и трубчатые) на основе высокопроницаемых никель-цинковых ферритов применяются для изготовления высокочастотных дроссельных катушек индуктивности. Благодаря высокому значению эффективной магнитной проницаемости ферритового сердечника дроссель, выполненный на его основе, имеет однослойную обмотку, что обеспечивает малую величину собственной емкости. В результате этого исключаются резонансные явления в широком диапазоне частот и частотные характеристики дросселя улучшаются.

В табл. 13 и 14 приведены размеры и эффективные проницаемости сердечников, используемых в высокочастотных дросселях.

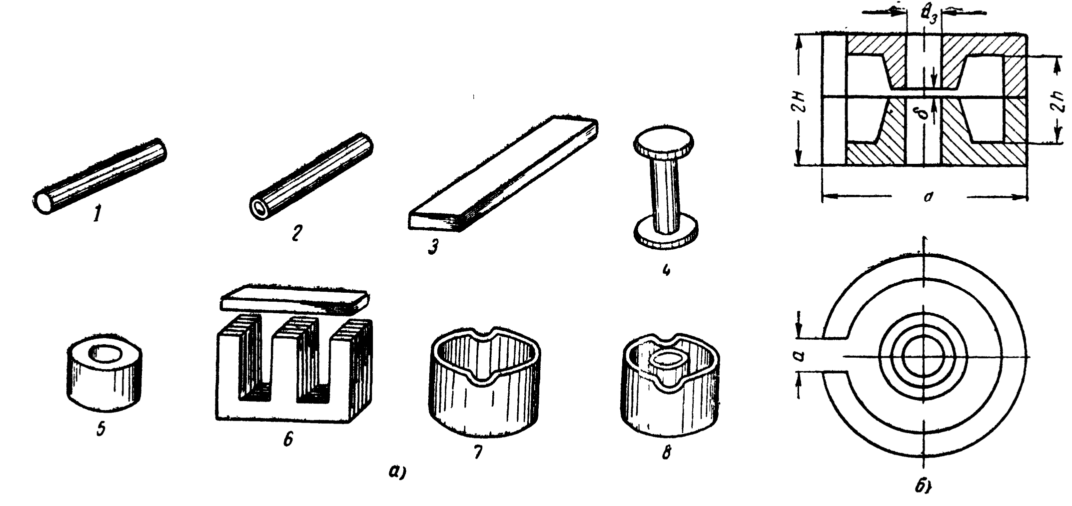


Рис. 31. Высокочастотные ферритовые сердечники.

а — типы сердечников *1* — цилиндрический; *2* — трубчатый; *3* — пластинчатый; *4* — шпулевидный; *6* — Ш-образный; *7* — чашечный; *8* — броневой; *б* — размеры броневого сердечника.

Таблица 13

Марки ферритов и размеры сердечников цилиндрической формы, используемых в высокочастотных дросселях

Марка феррита	Размеры сердечников, *мм*		Вес, *г*	Марка феррита	Размеры сердечников, *мм*		Вес, *г*	$\mu_{эфф}$
	диаметр	длина			диаметр	длина		
600 НН	1,8	12	0,14	600 НН	3,5	20	1,2	45
100 НН	2,74	12	0,34	600 НН	3,5	30	1,6	17
600 НН	2,74	12	0,34	600 НН	7,0		32,4	21
100 НН	2,74	14	0,4	600 НН	8,0	140	32,4	19
600 НН	2,74	14	0,4	600 НН	8,4		32,4	23
100 НН	2,86	12	0,34	600 НН	7,6		36,7	16
600 НН	2,86	12	0,34	600 НН	8,0	160	36,7	15
100 НН	2,86	14	0,4	600 НН	3,4		36,7	19
600 НН	2,86	14	0,4	600 НН	8,4		16,2	19
20 ВЧ	2,86	8	0,12	400 НН	9,8	40,5	14	40
600 НН	2,86	18	0,2	600 НН	17	14,5	13	12
600 НН	3,5	13	0,7					

Таблица 14

Марки ферритов и размеры сердечников трубчатой формы, используемых в высокочастотных дросселях

Марка феррита	Размеры, *мм*			$\mu_{эфф}$
	наружный диаметр	внутренний диаметр	длина	
600 НН	2,75	0,75	12	20
600 НН	35	0,9	13	20
1000 НН	6	2	32	30
1000 НН	16	8	57	20

Типоразмеры ферритовых броневых сердечников приведены в табл. 15. Благодаря большему значению проницаемости и меньшим частотным потерям ферритов по сравнению с магнитодиэлектриками на основе карбонильного железа броневые ферритовые сердечники превосходят карбонильные по добротности и эффективной проницаемости в несколько раз. Но при этом следует учитывать их меньшую температурную и временную стабильность.

При изготовлении вариометров с целью повышения коэффициента перекрытия по индуктивности применяются П-образные высо-

Таблица 15

Размеры броневых ферритовых сердечников

Типоразмер	Размеры сердечников, мм (рис 31, б)				Длина магнитной цепи $l_{эфф}$, см	Сечение сердечника $S_{эфф}$, $см^2$	Объем сердечника $V_{эфф}$, $см^3$
	d	$d_з$	$2H$	$2h$			
Б6	6,5	1,1	5,6	4	1,07	0,063	0,068
Б9	9	1,9	5,6	4	1,18	0,089	0,105
Б11	11	1,9	6,4	4,4	1,35	0,111	0,150
Б14	14	3,1	8,4	5,8	1,90	0,270	0,514
Б18	18	3,1	10,6	7,4	2,29	0,445	1,019
Б22	22	4,5	13,6	9,4	3,01	0,662	1,990
Б26	26	5,5	16,4	11,2	3,60	0,994	3,582
Б30	30	5,5	19,0	13,2	4,30	1,240	5,327
Б36	36	5,5	22,0	14,8	5,20	2,154	11,20
Б48	48	7,5	31,4	20,8	6,88	3,529	24,26

копроницаемые ферритовые сердечники (рис. 32, *а* и *б*). При определенных положениях ротора и статора магнитные потоки ротора и статора складываются и индуктивность вариометра имеет максимальное значение. При повороте ротора относительно статора на

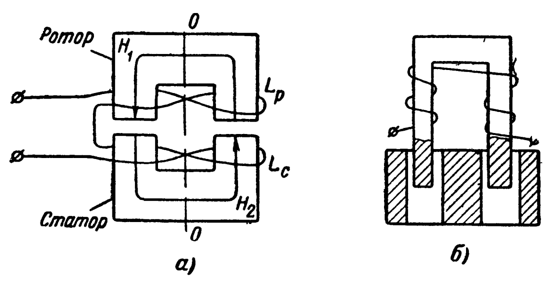


Рис. 32. Вариометры с вращающимся (*а*) и поступательным (*б*) движением сердечника.

180° потоки вычитаются и индуктивность становится минимальной. Такая конструкция вариометра обеспечивает получение коэффициента перекрытия, равного нескольким десяткам.

Использование П-образного сердечника путем введения его в ферритовое основание позволяет плавно изменять индуктивность вариометра.

Если сердечник изготовлен из никель-цинкового феррита с проницаемостью $\mu_н = 1\,000$, то коэффициент перекрытия K_L получается больше 100.

В отдельных случаях изготавливают вариометры на основе ферритов с большой величиной обратимой проницаемости. При

Таблица 16

Размеры и электромагнитные параметры сердечников магнитных антенн

Рабочий диапазон частот, *Мгц*	Добротность не менее	Частота (измеренная), *Мгц*	Индуктивность эталонной катушки с сердечником, *мкгн*	Начальная магнитная проницаемость, *гс/э*	Размеры сердечников, *мм*: стержни, диаметр	стержни, длина	пластины, сечение	пластины, длина
0,05—0,35	120	0,35	4 100±20%	2 000	8	60	—	—
					—	—	16×4	80
					8	100	16×4	100
					—	—	20×3	100
0,15—1,6	120	1,5	350±20%	600	8	60	—	—
					8	65	—	—
					8	80	16×4	80
					8	100	16×4	100
					—	—	20×3	100
—	150	—	—	400	—	—	20×3	115
					8	125	16×4	125
					—	—	20×3	125
					8	140	—	—
					8	160	25×5	160
					10	200	25×5	200
6—18	140	18	2,2±20%	200	8	125	—	—
					8	160	25×5	160
					10	200	—	—
18—30	100	30	0,8±20%	50	8	125	—	—
					8	160	25×5	160
					10	200	—	—
40—100	200	70	0,09±20%	20	8	160	—	—
					10	200	—	—
40—100	200	70	0,09±20%	20	8	160	—	—
					10	200	—	—

этом применяют две катушки: основную — высокочастотную и управляющую, через которую порпускают постоянный ток. Меняя величину постоянного тока, можно управлять величиной проницаемости сердечника, а следовательно, и индуктивностью высокочастотной катушки.

Ферритовые сердечники для антенных катушек выпускаются цилиндрической и прямоугольной форм. Основные размеры антенных сердечников и их электромагнитные параметры приведены в табл. 16.

Указанные значения добротности относятся к измерительным катушкам соответствующей индуктивности, намотанным проводом ЛЭШО 21×0,07 и расположенным в средней части сердечника.

Примеры применения катушек индуктивности с магнитными сердечниками

Катушки индуктивности с магнитными сердечниками находят широкое применение во входных устройствах, преобразователях частоты, усилителях высокой и промежуточной частоты радиовещательных приемников и в некоторых схемах генераторов.

Входное устройство приемника обычно состоит из резонансных контуров, настроенных на частоту принимаемых сигналов, и элемента связи антенны с соответствующим контуром. Оно предназначено для передачи сигнала, принятого антенной, входному контуру. При настройке последнего в резонанс сигнал усиливается и передается в последующие цепи схемы. Степень усиления сигнала определяется величиной коэффициента передачи, который равен отношению напряжения сигнала на контуре к э. д. с. сигнала, действующего в антенне. Он тем больше, чем выше добротность контура для данной частоты и больше величина связи антенны с контуром.

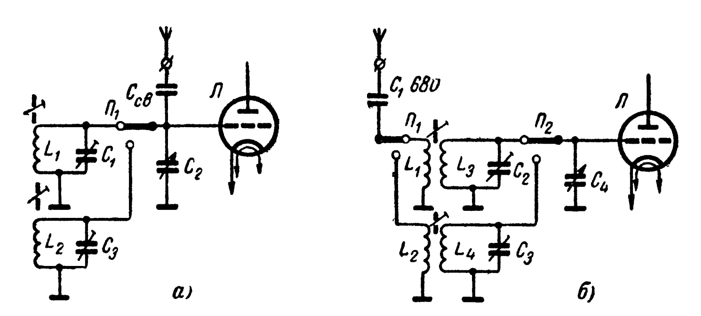


Рис. 33. Схемы входных устройств.

а — с емкостной связью с антенной, *б* — с индуктивной связью с антенной.

Различают несколько разновидностей схем входных устройств: с емкостной связью с антенной, с индуктивной связью с антенной и с магнитными антеннами.

В схеме входного устройства с емкостной связью с антенной (рис. 33, *а*) последняя подключается к входному контуру через

конденсатор связи $C_{св}$. С целью обеспечения максимальной добротности контуров и их стабильности катушки индуктивности часто выполняются с применением броневых карбонильных сердечников.

Схема с индуктивной связью входного контура с антенной изображена на рис. 33, *б*. Для получения большей добротности и повышения коэффициента связи катушки индуктивности следует намотать на броневых сердечниках из феррита марки 600 НН для длинноволнового диапазона и марки 100 НН для средневолнового.

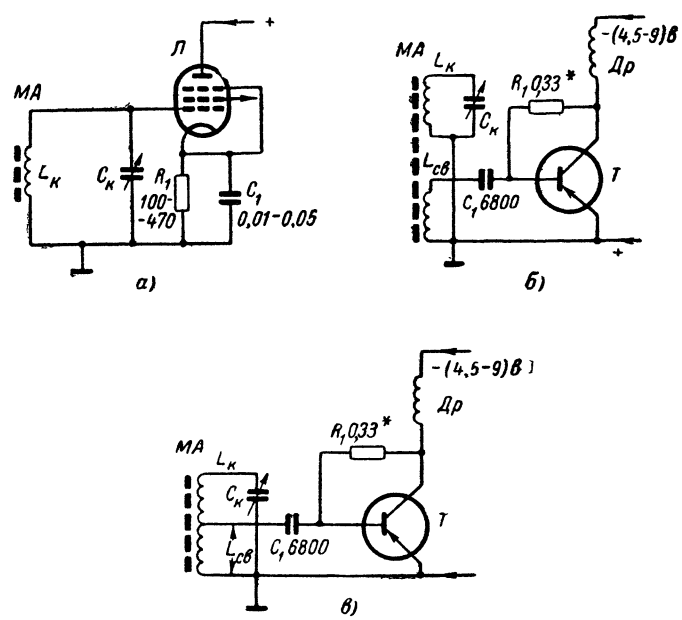


Рис. 34. Схемы входных устройств с магнитными антеннами.

а — для ламповых приемников; *б* и *в* — для транзисторных приемников.

В целях повышения пространственной избирательности приемника, его чувствительности и уменьшения габаритов применяют входные устройства с магнитными антеннами (*МА*) (рис. 34). Для ламповых приемников, предназначенных для работы в диапазонах длинных и средних волн, лучше всего использовать магнитную антенну из феррита марки 600 НН. Эту же марку феррита целесообразно применять и для магнитных антенн транзисторных приемников. Во всех случаях при использовании феррита 600 НН будет достигнута максимально возможная добротность входных контуров в диапазоне частот от 0,15 до 1,6 *Мгц* при наибольшем коэффициенте передачи.

Для усиления сигналов высокой частоты применяются апериодические и резонансные усилители. Последние выполняются с при-

менением резонансных контуров и в отличие от апериодических увеличивают не только чувствительность, но и избирательность приемника.

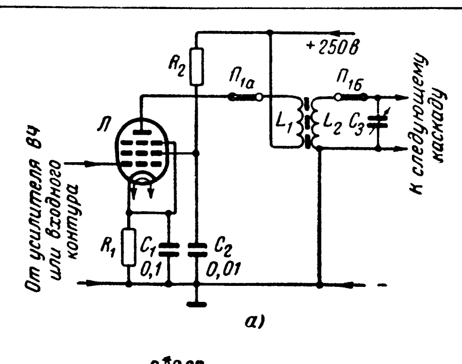
В резонансных усилителях (рис. 35, *а*) контуры должны отличаться высокой добротностью в широком диапазоне частот и хорошей стабильностью при воздействии температуры и магнитного поля. Для удовлетворения этим требованиям катушки индуктивности могут выполняться на карбонильных сердечниках типа СЦГ-2 или СЦТ-2.

В апериодических усилителях (рис. 35, *б*) применяются катушки связи. Для повышения коэффициента связи их целесообразно выполнять на броневых сердечниках из феррита марки 600 НН.

Преобразователи частоты супергетеродинных приемников состоят из гетеродина и смесителя. Гетеродин является маломощным генератором высокочастотных колебаний, частота которых выше частоты принимаемого сигнала на 110 или 465 *кгц* в диапазонах ДВ, СВ и КВ и на 8,4 *Мгц* в диапазоне УКВ. Генерируемые гетеродином колебания подаются на смеситель, где они «смешиваются» с напряжением сигнала. В результате на выходе смесителя в контуре, настроенном на промежуточную частоту, получается сигнал промежуточной частоты, модулированный так же, как и высокочастотный сигнал. Для обеспечения стабильности частоты и амплитуды генерируемых гетеродином колебаний контурная катушка должна быть выполнена на броневом карбонильном сердечнике типа СБ-3а для диапазона ДВ; СБ-1а — для диапазона СВ и СВ-0а — для диапазонов КВ и УКВ. В случае применения преобразователей частоты на транзисторах (рис. 36) промежуточная частота может быть равна 110 или 465 *кгц* и гетеродин генерирует колебания для диапазона ДВ с частотой 520 или 885 *кгц*, а для диапазона СВ 1 710 или 2 065 *кгц* соответственно. Поэтому для контурных катушек гетеродина могут быть использованы карбонильные сердечники СБ-1а для диапазона ДВ и СВ-0а для диапазона СВ.

Для усиления сигналов промежуточной частоты в супергетеродинных приемниках на лампах или транзисторах применяются один, два или три каскада усиления. Усилитель промежуточной частоты должен обеспечивать высокую чувствительность, избирательность и широкую полосу пропускания сигнала. Часто в приемниках применяют «полосовые» усилители промежуточной частоты (рис. 37). В это устройство входит полосовой фильтр, состоящий из двух связанных контуров, настроенных на промежуточную частоту. Катушки индуктивности этих контуров должны обеспечить высокую стабильность и поэтому часто изготавливаются на карбонильных сердечниках типа СБ-1а.

Специфические особенности, заключающиеся в резко выраженной зависимости магнитной проницаемости от величины постоянного намагничивающего поля, позволили использовать ферриты для управления частотой генераторов высокочастотных колебаний. На рис. 38 изображена принципиальная схема генератора с магнитной перестройкой частоты. Эта схема предусматривает управление частотой гетеродина в растянутых коротковолновых поддиапазонах радиоприемника. Оно осуществляется путем изменения величины тока в цепи подмагничивания катушек индуктивности L_1—L_3, которые соединены с основными контурными катушками L'_1—L'_3. Ток



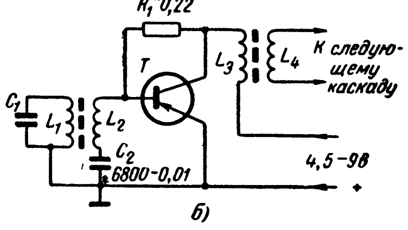


Рис. 35. Схемы усилителей.
а — резонансного, *б* — апериодического.

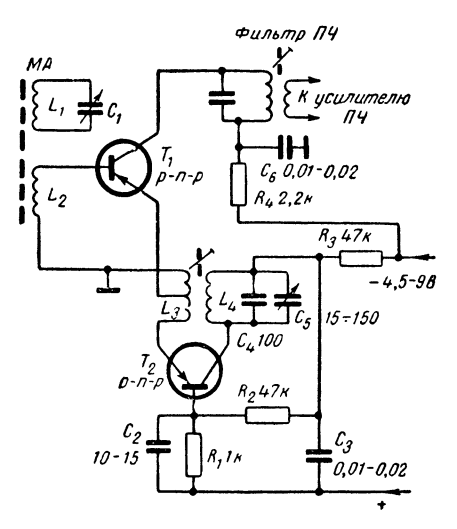


Рис. 36. Преобразователь частоты на транзисторах

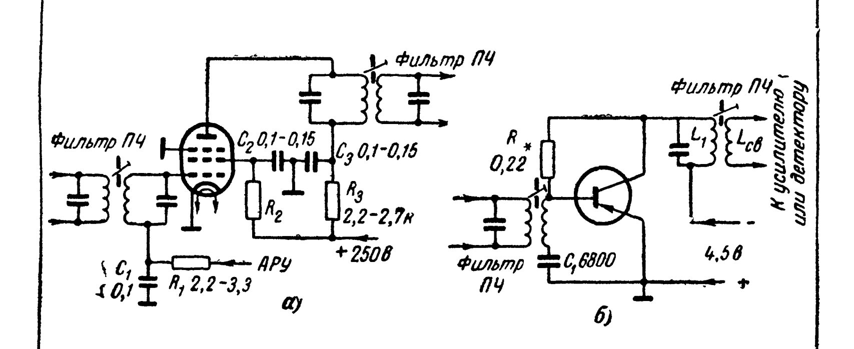


Рис. 37. Схемы каскадов усиления промежуточной частоты.

а — на пентоде с полосовым фильтром; *б* — на транзисторе с одним источником питания.

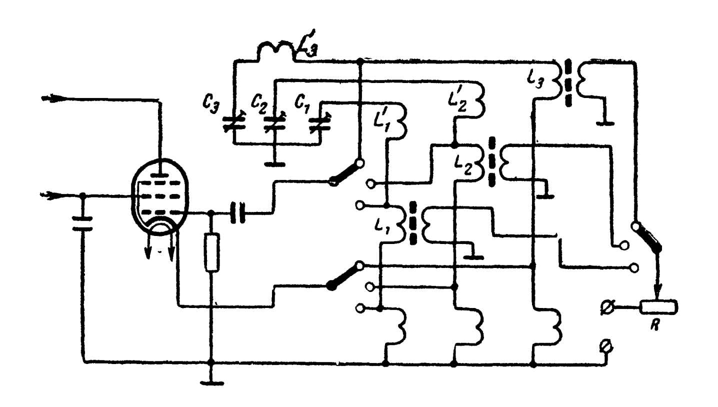


Рис. 38. Схема генератора с магнитной перестройкой частоты.

подмагничивания регулируется переменным резистором R в пределах 20—250 *ма.*

Катушка L_1 выполняется на сердечнике из феррита марки 100 НН, а катушки L_2 и L_3 — из феррита марки 400 НН.

Приведенные примеры использования высокочастотных магнитных сердечников в радиосхемах являются далеко не исчерпывающими, но они подтверждают необходимость рационального выбора магнитного материала и формы сердечника на его основе в зависимости от назначения устройства.

ГЛАВА ПЯТАЯ

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СЕРДЕЧНИКОВ ИЗ НИХ

Определение магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь в диапазоне частот от 0,01 до 1 *Мгц*

Для определения электромагнитных параметров можно воспользоваться двумя методами: мостовым и резонансным.

Мостовой метод предназначен для оценки качества магнитодиэлектриков на основе альсифера и карбонильного железа и ферритов с проницаемостью меньше 100. Для ферритов с более высоким значением проницаемости применяют резонансный метод.

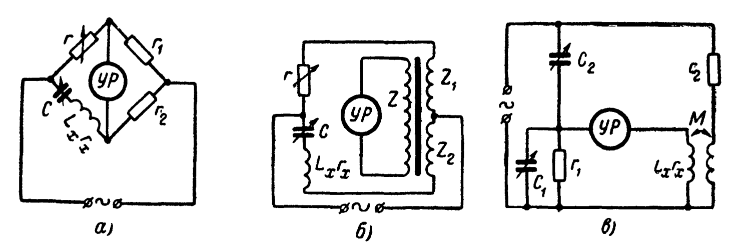


Рис. 39. Схемы резонансных мостов.

а — мост индуктивности; *б* — мост индуктивности с дифференциальным трансформатором; *в* — мост взаимной индуктивности.

Мостовой метод, основанный на компенсации индуктивности и сопротивлении потерь измеряемого образца соответствующими плечами моста, позволяет определять интересующие нас электромагнитные параметры при частоте и напряженности поля, значения которых приведены в табл. 17.

Измерительной установкой может служить резонансный мост или мост взаимной индукции (рис. 39). Основными элементами ре-

Таблица 17

Условия измерений параметров высокочастотных магнитных материалов

Измеряемый параметр	Пределы измерений	Допустимая погрешность измерения, %	Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа. Условия измерений: *f, кгц*	Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа. Условия измерений: $H_м$, *а/м*	Магнитодиэлектрики на основе альсифера. Условия измерений: *f, кгц*	Магнитодиэлектрики на основе альсифера. Условия измерений: $H_м$, *а/м*	Ферриты: *f, кгц*	Ферриты: $H_м$, *а/м*
Относительная магнитная проницаемость μ	10—100 100—6 000	±2*	100—1 000 —	8,0 —	100—300 —	8,0 —	— 10—100	— 0,8
Тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$	10^{-3}—1,0	±5	100, 300, 1 000	8,0; 80	100—300	8,0 80	100	0,8
Коэффициенты потерь: $\delta_г$, *м/а* $\delta_ч$, 1/*гц* $\delta_д$	 10^{-6}—$3 \cdot 10^{-5}$ $1 \cdot 10^{-9}$—$1,5 \cdot 10^{-6}$ $2 \cdot 10^{-4}$—$5 \cdot 10^{-2}$	 ±10 ±20 ±20	10—1 000	8,0; 80	10—300	8,0; 80	—	—
Температурный коэффициент[1] магнитной проницаемости β_1, $\frac{1}{град}$	$6 \cdot 10^{-5}$—$1 \cdot 10^{-2}$	±20	100—1 000	≤0,8	100—300	0,8	100—300	0,8

* Погрешность измерения только электрических параметров (без учета погрешностей измерения геометрических размеров).
[1] В интервале температур, где этот коэффициент постоянен.

зонансного моста, предназначенного для работы в диапазоне частот от 10 до 1 000 *кгц*, являются: магазин сопротивлений r, магазин емкости C и плечи отношений r_1 и r_2 высокой точности (рис. 39, *а*). Плечи отношений могут быть реактивными (Z_1 и Z_2); в этом случае (рис. 39, *б*) можно использовать дифференциальный трансформатор, вторичная обмотка которого Z подключается к указателю равновесия ($УР$) моста.

Основные требования, предъявляемые к установке: возможность изменения намагничивающего тока в пределах от 1 до 100 *ма* и малые изменения измерительной частоты.

Для моста взаимной индуктивности, предназначенного для работы в диапазоне частот до 50 *кгц*, основными элементами являются магазины емкости C_1 и C_3 и активные сопротивления r_2 и r_1 высокой точности, работающие при токе до 100 *ма* (рис. 39, *в*). В этом случае требования к источнику питания остаются теми же.

Измерения начальной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь производят при заданных значениях частоты и напряженности поля, величину которой определяют по формуле

$$H_{м} = \frac{wI_{м}}{2\pi R_{ср}} = \frac{1{,}41 wI_{д}}{2\pi R_{ср}}, \qquad (60)$$

где $I_{м}$ — амплитудное значение тока;
$I_{д}$ — действующее значение тока.

С учетом собственной емкости $C_к$ образца истинное значение тока в обмотке $I_{д}'$ следует вычислять по формуле

$$I_{д}' = \frac{I_{д}}{1 + \omega^2 L_x C_к} \qquad (61)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота.

По измеренному резонансным методом значению индуктивности производят подсчет магнитной проницаемости по формуле

$$\mu = \frac{L_x' D_{ср} \cdot 10^7}{4Sw^2}, \qquad (62)$$

где L_x' — индуктивность образца с учетом поправки на его собственную емкость.

Влияние собственной емкости учитывается формулой

$$L_x' = L_x\left(1 - \omega^2 L_x C_к\right) = L_x(1 - A), \qquad (63)$$

где L_x — измеренное значение индуктивности.

Собственная емкость образцов, проницаемость которых от частоты не зависит, определяется путем измерения индуктивности при двух частотах и одном и том же токе в образце и рассчитывается по формуле

$$C_к = \frac{L_2 - L_1}{L_2 L_1\left(\omega_2^2 - \omega_1^2\right)}, \qquad (64)$$

где L_1 и L_2 — индуктивности, измеренные соответственно при круговых частотах ω_1 и ω_2.

Для высокопроницаемых ферритов, проницаемость которых изменяется с частотой, собственную емкость обмотки определяют на образце из электроизоляционного материала (органическое стекло, полистирол, текстолит, эбонит и др.) таких же размеров, как и используемый сердечник, указанным выше методом.

Наибольшая относительная погрешность определения магнитной проницаемости зависит от погрешностей измерения геометрических размеров образца и его индуктивности, определяемой точностью мостовой схемы, и может быть вычислена по формуле

$$\frac{\Delta\mu}{\mu}=\frac{\Delta D_{\text{ср}}}{D_{\text{ср}}}+\frac{\Delta S}{S}+\frac{\Delta L_x'}{L_x'}. \qquad (65)$$

Определение тангенса угла магнитных потерь при соответствующих значениях частоты и напряженности поля производится по результатам измерений сопротивления потерь и индуктивности на мостовой схеме.

Подсчет $\operatorname{tg}\delta_\mu$ производится по формуле

$$\operatorname{tg}\delta_\mu=\frac{R_{\text{с}}}{\omega L_x'}=\frac{R_{\text{к}}'-R_{\text{обм}}'}{\omega L_x'}, \qquad (66)$$

где $R_{\text{с}}$ — сопротивление потерь в сердечнике;
$R_{\text{к}}'$ — сопротивление потерь катушки с сердечником;
$R_{\text{обм}}'$ — активное сопротивление обмотки.

С учетом собственной емкости $R_{\text{к}}'$ подсчитывается по формуле

$$R_{\text{к}}'=R_{\text{к}}\left(1-2\omega^2 L_x C_{\text{к}}\right)=R_{\text{к}}(1-2A), \qquad (67)$$

где $R_{\text{к}}$ — сопротивление образца, измеренное на заданной частоте.

Для примера в табл. 18 приведены значения поправок, обусловленных влиянием собственной емкости на величины индуктивности и сопротивления потерь.

Таблица 18

Значения поправок для L_x' и $R_{\text{к}}'$ с учетом собственной емкости ($L_x=2\cdot10^{-4}$ *гн*; $C_{\text{к}}=8$ *пф*)

f, кгц	A/L_x, %	$2A/R_x$, %
100	0,1	0,1
200	0,2	0,5
300	0,6	1,1
500	1,6	3,2
600	2,3	4,6
1 000	6,3	1,3

Значения сопротивления $R_{\text{обм}}'$ подсчитывают по формуле

$$R_{\text{обм}}'=R_{\text{обм}}k_\omega, \qquad (68)$$

где $R_{\text{обм}}$ — сопротивление обмотки постоянному току;
k_ω — поправка, учитывающая влияние поверхностного

эффекта и зависящая от частоты намагничивающего тока и марки провода:

$$k_\omega = \frac{R'_{\text{обм}}}{R_{\text{обм}}} = N' + k\left(\frac{nd_s}{d_0}\right)^2 G, \qquad (69)$$

где N' и G — коэффициенты, зависящие от диаметра отдельной проволоки литцендрата и частоты;

d_s — диаметр отдельной проволоки литцендрата;

n — число жил литцендрата;

d_0 — диаметр всего провода;

k — коэффициент, зависящий от n.

В табл. 19 для примера приведены результаты подсчета изменения сопротивления провода марки ЛЭШО 12×0,07 с изменением частоты.

Таблица 19

Изменение сопротивления провода в зависимости от частоты

f, *кгц*	N'	G	K_ω	$\frac{R'_{\text{обм}} - R_{\text{обм}}}{R_{\text{обм}}}$, %
100	1,000	0,00006	1,0000	0
200	1,000	0,00020	1,0022	0,2
300	1,000	0,00035	1,0039	0,4
500	1,000	0,00122	1,0134	1,3
600	1,0005	0,00175	1,0198	2,0
1 000	1,0015	0,00480	1,0543	5,4

Наибольшая относительная погрешность определения тангенса угла потерь подсчитывается по формуле

$$\frac{\Delta \operatorname{tg} \delta_\mu}{\operatorname{tg} \delta_\mu} = \frac{\Delta R_c}{R_c} + \frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta L'_x}{L'_x}. \qquad (70)$$

Для определения начальной проницаемости и тангенса угла потерь ферритов с $\mu_н \geqslant 100$, а также относительной добротности и эффективной проницаемости магнитодиэлектрических сердечников соответствующей формы пользуются резонансным методом.

В качестве измерительного прибора применяют измеритель добротности (куметр), с помощью которого можно измерять требуемые характеристики в широком диапазоне частот.

Для измерения $\mu_н$ и $\operatorname{tg} \delta_\mu$ ферритов в диапазоне частот до 1 *Мгц* после подключения образца к зажимам L_x куметра устанавливают нужную частоту и регулированием емкости резонансного контура добиваются максимального отклонения указателя шкалы добротности, что соответствует резонансу.

Индуктивность подсчитывают по формуле

$$L_x = \frac{1}{(2\pi f)^2 C}, \qquad (70')$$

где C — резонансная емкость куметра.

Значение магнитной проницаемости определяют по формуле (62).

При частотах до 300 *кгц* поправка к индуктивности на собственную емкость образца не превышает 1%, а при частоте 1 *Мгц* она составляет около 10%. Относительная погрешность определения индуктивности с помощью куметра выражается формулой

$$\frac{\Delta L}{L} = 2\frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta C}{C}. \qquad (71)$$

Для определения эффективной проницаемости производят на заданной частоте два измерения: сначала измерение резонансной катушки с сердечником $C_с$, а затем — без сердечника $C_к$. Подсчет эффективной проницаемости производят по формуле

$$\mu_{эфф} = \frac{C_к}{C_с}. \qquad (72)$$

Относительная погрешность измерения $\mu_{эфф}$ определяется также погрешностями измерения частоты и емкости куметра.

Тангенс угла магнитных потерь подсчитывают по формуле

$$\operatorname{tg}\delta_\mu = \frac{1}{Q} - \frac{R'_{обм}}{\omega L'_x}, \qquad (73)$$

где Q — добротность образца, отсчитываемая по шкале куметра;

L'_x — индуктивность катушки с сердечником;

$R_{обм}$ — сопротивление обмотки.

Для определения относительной добротности сердечника $Q_{отн}$ соответствующей формы производят измерения добротности катушки с сердечником $Q_с$ и без него $Q_к$.

Подсчет относительной добротности производят по формуле

$$Q_{отн} = \frac{Q_с}{Q_к}. \qquad (74)$$

Погрешность определения $\operatorname{tg}\delta_\mu$ и $Q_{отн}$ зависит от погрешности измерения добротности и резонансной емкости куметра.

Определение коэффициентов потерь в диапазоне частот от 0,01 до 1 *Мгц*

Для определения коэффициентов потерь берется линейный участок зависимости $\operatorname{tg}\delta_\mu$ от частоты и напряженности поля.

Коэффициент потерь на гистерезис определяют путем измерения $\operatorname{tg}\delta_\mu$ на постоянной частоте при двух значениях напряженности поля: $H_{м1}$ и $H_{м2}$ и определяют по формуле

$$\delta_г = \frac{\operatorname{tg}\delta_{\mu 2} - \operatorname{tg}\delta_{\mu 1}}{H_{м2} - H_{м1}}, \qquad (75)$$

где $\operatorname{tg}\delta_{\mu 2}$ и $\operatorname{tg}\delta_{\mu 1}$ — тангенсы угла потерь, подсчитанные по формуле (71) соответственно при напряженностях $H_{м2}$ и $H_{м1}$.

Наибольшую относительную погрешность определения коэффициента потерь на гистерезис подсчитывают по формуле

$$\frac{\Delta\delta_г}{\delta_г} = \frac{2\Delta R_с}{R_{с\,2} - R_{с1}} + \frac{\Delta H_{м2} + \Delta H_{м1}}{H_{м2} - H_{м1}} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta L_x'}{L_x'}. \quad (76)$$

При малых потерях на гистерезис, когда коэффициент потерь составляет примерно $1 \cdot 10^{-6}$ *м/а* ($\delta_г \approx 1 \cdot 10^{-4}$ 1/э), необходимо получать большие приращения сопротивления потерь. Для этого $R_к$ следует измерять при частоте больше 500 *кгц*. Приращение сопротивления в этом случае будет более 0,1 *ом*.

Для определения коэффициента частотных потерь производятся измерения $\operatorname{tg}\delta_\mu$ при постоянном значении напряженности поля $H_м$ и двух значениях частоты. Подсчет $\delta_ч$ производят по формуле

$$\delta_ч = \frac{\operatorname{tg}\delta_{ч2} - \operatorname{tg}\delta_{ч1}}{f_2 - f_1}, \quad (77)$$

где $\operatorname{tg}\delta_{ч2}$ и $\operatorname{tg}\delta_{ч1}$ — тангенсы угла потерь, подсчитанные по формуле (71) при частотах f_2 и f_1.

Для повышения точности определения $\delta_ч$ измерения следует производить при значительно различающихся частотах f_1 и f_2 и учитывать влияние собственной емкости при подсчете величины напряженности поля $H_м$.

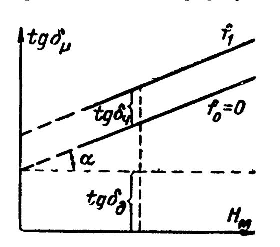


Рис. 40. Графический метод определения коэффициентов потерь.

Наибольшую относительную погрешность определения коэффициента частотных потерь (пренебрегая погрешностью измерения частоты) подсчитывают по формуле

$$\frac{\Delta\delta_ч}{\delta_ч} = \frac{\frac{1}{f_2}\Delta R_{с2} - \frac{1}{f_1}\Delta R_{с1}}{\frac{1}{f_2}R_{с2} - \frac{1}{f_1}R_{с1}}. \quad (78)$$

Коэффициент дополнительных потерь определяют путем измерения тангенса угла магнитных потерь на частоте f при напряженности поля $H_м$ и с учетом полученных значений для $\delta_г$ и $\delta_ч$ подсчитывают по формуле

$$\delta_д = \operatorname{tg}\delta_\mu - (\operatorname{tg}\delta_г + \operatorname{tg}\delta_ч) = \operatorname{tg}\delta_\mu - \delta_г H_м - \delta_ч f. \quad (79)$$

Наибольшая абсолютная погрешность определения коэффициента дополнительных потерь выражается следующей формулой:

$$\Delta\delta_д = \Delta\operatorname{tg}\delta_\mu + \Delta\delta_г H_м + \delta_г \Delta H_м + \Delta\delta_ч f + \delta_ч \Delta f. \quad (80$$

Коэффициенты потерь могут быть определены графически (рис. 40), для чего снимают зависимость $\operatorname{tg}\delta_\mu$ от $H_м$ при нескольких значениях частоты. Продолжив прямую $\operatorname{tg}\delta_\mu = F(H_м)$ до пере-

сечения с осью ординат ($H_м=0$), получают графические значения тангенсов углов соответствующих потерь. Тангенс угла дополнительных потерь $\mathrm{tg}\,\delta_д$ и коэффициент дополнительных потерь равны отрезку на оси ординат, отсекаемому прямой $\mathrm{tg}\,\delta_\mu = F(H_м)$ при $f=0$. Тангенс угла частотных потерь $\mathrm{tg}\,\delta_ч$ равен отрезку на оси ординат, заключенному между прямыми $\mathrm{tg}\,\delta_\mu = F(H_м)$ при $f=f_1$ и $f=f_0$. Коэффициент потерь на гистерезис равен тангенсу угла наклона прямой $\mathrm{tg}\,\delta_\mu = F(H_м)$ к оси абсцисс α при любой из выбранных частот.

Определение магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь в диапазоне частот от 1 до 100 *Мгц*

Определение электромагнитных параметров магнитных материалов на частотах более 1 *Мгц* с помощью описанных выше приборов представляет большую трудность, вызванную погрешностями, вносимыми обмоткой.

В последнее время предложен ряд методов, позволяющих измерять $\mathrm{tg}\,\delta_\mu$ и $\mu_н$ в диапазоне частот от 1 до 100 *Мгц* без применения обмотки. В основу этих методов положено определение полного сопротивления намагничивающего элемента измерительной схемы. Испытуемый материал, помещенный в магнитное поле, вносит определенные изменения величины реактивной и активной составляющих полного сопротивления схемы. По величинам этих изменений можно судить о параметрах магнитного материала.

Измерения производят на кольцевых сердечниках, размеры которых должны быть выбраны таким образом, чтобы отношение внешнего диаметра к внутреннему равнялось 2—2,5, а максимальный внешний диаметр был 15 *мм*.

Рис. 41. Конструкция высокочастотного двухконтурного пермеаметра.

Для определения параметров в диапазоне частот от 1 до 30 *Мгц* могут применяться высокочастотные двухконтурные пермеаметры типа ПВЧ, работающие на фиксированных частотах: ПВЧ-1 — на частоте 1 *Мгц*; ПВЧ-2 — на частотах 5, 10, 20 и 30 *Мгц*

Конструкция высокочастотного двухконтурного пермеаметра изображена на рис. 41.

Измеряемый сердечник *3* помещают на дно сплошного замыкающегося медного цилиндра *2*, охватывающего первичную обмотку *1*. Этот цилиндр служит вторичной обмоткой. Концы первичной обмотки *5* подводятся к наконечникам специальной конструкции *4*, которые крепятся к фторопластовой пластине *6*. Сердечник с первичной обмоткой отделяется от измеряемого с помощью фторопластовой пластины *7*. Крышка *8* служит устройством, закорачивающим верхнюю обмотку. С помощью кулачкового затвора *9* медная пластина *10* прижимается своей контактной поверхностью к цилиндру *2*.

При измерении электроды пермеаметра присоединяют к клеммам L куметра, после чего устанавливают требуемую частоту. Далее производятся измерения резонансной емкости $C_{х.х}$ и добротности $Q_{х.х}$ пермеаметра с разомкнутой вторичной обмоткой (холостой ход), измерения резонансной емкости $C_{к.з}$ и добротности $Q_{к.з}$ пермеаметра с испытуемым образцом.

Подсчет начальной проницаемости и тангенса угла потерь производится по формулам:

$$\mu_н = 1 + \frac{k \dfrac{C_{к.з\,ф}}{C_{ф.х.х}}}{L_д}, \qquad (81)$$

$$\operatorname{tg} \delta_\mu = \frac{\mu_н - 1}{\mu_н} \left\{ \frac{C_{к.з\,х.х} C_{ф.х.х}}{C_{к.з.ф}} \cdot \left[\frac{1}{C^2_{ф.х.х}} \left(\frac{C_ф}{Q_ф} - \frac{C^2_ф}{Q_{х.х} C_{х.х}} \right) - \frac{1}{C_{к.з.х.х}} \left(\frac{C_{к.з}}{Q_{к.з}} - \frac{C^2_{к.з}}{Q_{х.х} C_{х.х}} \right) \right] + 2 \operatorname{tg} \delta_п \right\}, \qquad (82)$$

где k и $\operatorname{tg} \delta_п$ — постоянные пермеаметра;

$L_д = 4{,}6 \cdot 10^{-9} h \lg \frac{D_н}{D_в}$, *гн* — геометрическая индуктивность образца высотой h с наружным диаметром $D_н$ и внутренним диаметром $D_в$;

$C_{к.з.ф} = C_{к.з} - C_ф$, *пф*;

$C_{ф.х.х} = C_ф - C_{х.х}$, *пф*;

$C_{к.з.х.х} = C_{к.з} - C_{х.х}$, *пф*.

Наибольшая относительная погрешность при измерении $\mu_н$ составляет 10%, а tg_μ 30% $+ 3 \cdot 10^{-2}$.

Определение электромагнитных параметров в диапазоне частот 30—80 *Мгц* следует производить с помощью компенсационного держателя (рис. 42) в сочетании с измерителем добротности.

Измерения следует производить в следующем порядке:

а) установить частоту генератора куметра;

б) разомкнуть ключ *5*;

в) определить значение резонансной емкости конденсатора куметра при отключенном держателе;

г) замкнуть ключ *5*;

д) вращая микрометрический винт *2*, настроиться в резонанс дисковым конденсатором *4—6* держателя;

е) зафиксировать значения емкости дискового конденсатора, добротности и длины линии *7*;

ж) поместить испытуемый образец в специальную камеру *9* держателя;

з) настроиться в резонанс изменением длины линии *7* при неизменных положениях конденсаторов куметра и держателя.

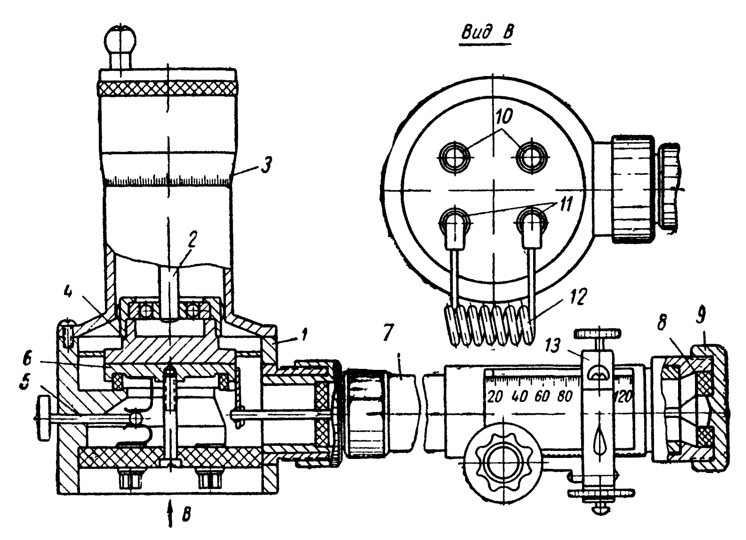


Рис. 42. Конструкция компенсационного держателя.

1 — корпус; *2* — микрометрический винт для перемещения обкладки конденсатора; *3* — отсчетное устройство; *4* — низкопотенциальная обкладка конденсатора; *5* — ключ; *6* — высокопотенциальная обкладка конденсатора; *7* — переменная индуктивность в виде длинной линии; *8* — испытуемый образец; *9* — зажимное устройство; *10* — клеммы для подключения к зажимам куметра C_x; *11* — клеммы для подключения к зажимам куметра L_x; *12* — индуктивность, подключаемая к клеммам L_x; *13* — отсчетное устройство.

Подсчет проницаемости и тангенса угла потерь производится по следующим формулам:

$$\mu_н = \frac{\Delta l}{h} m + 1, \tag{83}$$

$$\operatorname{tg} \delta_\mu = \frac{Q' - Q''}{Q' Q''} \cdot \frac{C_1}{C_2^2 \omega^2 \mu_н L_д}, \tag{84}$$

где Δl — изменение длины линии, которое определяется с помощью отсчетного устройства *13*, *мм*;

h — высота образца, *мм*;

$$m = \frac{\lg \frac{D_1}{D_2}}{\lg \frac{d_1}{d_2}}$$ — постоянная держателя;

D_1 — внешний диаметр линии, *мм*;
D_2 — внутренний диаметр линии, *мм*;
d_1 — внешний диаметр образца, *мм*;
d_2 — внутренний диаметр образца, *мм*;
C_1 — емкость конденсатора куметра при разомкнутом ключе, *ф*;
C_2 — емкость дискового конденсатора при замкнутом ключе, *ф*;
Q' — величина добротности без образца;
Q'' — величина добротности с образцом.

Максимальная относительная погрешность при измерении $\mu_н$ 10%, при измерении $\operatorname{tg} \delta_\mu$ $30\% + 3 \cdot 10^{-2}$.

Для определения $\mu_н$ и $\operatorname{tg} \delta_\mu$ в диапазоне частот 80—100 *Мгц* применяют одноконтурный пермеаметр с измерителем добротности

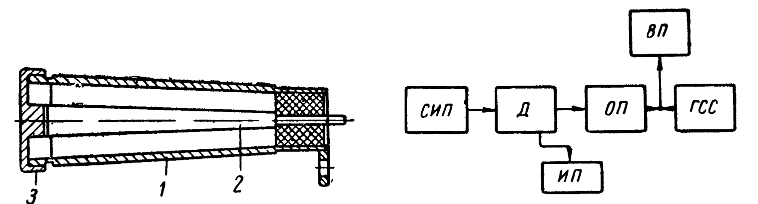


Рис. 43. Конструкция одноконтурного пермеаметра.

Рис. 44. Блок-схема измерения напряженности магнитного поля.

(рис. 43). По конструкции он представляет собой коаксиальный виток с внешним проводником *1*, центральным проводником *2* и крышкой-короткозамыкателем *3*.

При измерениях методом одноконтурного пермеаметра вначале определяют резонансную емкость и добротность пермеаметра без образца, а затем с образцом. Подсчет параметров производится по формулам:

$$\mu_н = 1 + \frac{L_п}{L_д} \cdot \frac{C_{к.з} - C_ф}{C_ф}; \qquad (85)$$

$$\operatorname{tg} \delta_м = \frac{1}{Q_{к.з}} \cdot \frac{\frac{Q_{к.з}}{Q_ф} C_{к.з} - C_ф}{C_{к.з} - C_ф}, \qquad (86)$$

где $L_п = 4{,}6\left(\lg \frac{D}{d}\, l\right) \cdot 10^{-9}$ — индуктивность пермеаметра, *гн*;

$C_{к.з}$, $Q_{к.з}$ — резонансная емкость, *пф*, и добротность пермеаметра без образца;
$C_ф$, $Q_ф$ — резонансная емкость, *пф*, и добротность пермеаметра с образцом.

При всех указанных измерениях можно определять напряженность поля, для чего необходимо собрать блок-схему, изображенную на рис. 44. На выход измерительного супергетеродинного приемника *СИП* (например, П5-1) включается датчик-катушка *Д* с малым числом витков, которая помещается в исследуемое поле. Приемник настраивается в резонанс с частотой поля и на эту же частоту настраивается генератор стандартных сигналов *ГСС*, на выход которого включен источник образцового поля *ОП* — соленоид с известной площадью поперечного сечения. Затем датчик *Д* переносится в соленоид и регулировкой входного напряжения *ГСС* добиваются такого же отклонения указателя выходного прибора *ВП*, как и при помещении датчика в исследуемое поле *ИП*.

Величина напряженности магнитного поля рассчитывается по формуле

$$H = \frac{10^7 U}{4\pi\omega S}, \ a/м, \tag{87}$$

где U — амплитудное значение напряжения, приложенного к соленоиду, *в*;
ω — круговая частота, *1/сек*;
S — площадь поперечного сечения соленоида, $м^2$.

Определение ТК$\mu_н$, ТК $\operatorname{tg} \delta_\mu$, временной стабильности и влагостойкости

Температурный коэффициент магнитной проницаемости β_1 определяется по изменению проницаемости образца в зависимости от изменения его температуры и рассчитывается по формуле

$$\beta_1 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 (t_2 - t_1)}, \tag{88}$$

где μ_2 и μ_1 — проницаемости образца при температурах t_2 и t_1.

Для определения $\beta \geqslant 200 \cdot 10^{-6}$ $1/°C$ можно воспользоваться любой мостовой схемой, позволяющей определять изменение индуктивности 0,1%. Для определения $\beta_1 \leqslant 200 \cdot 10^{-6}$ следует применять метод биений.

Наибольшая относительная погрешность определения β подсчитывается по формуле

$$\frac{\Delta\beta_1}{\beta_1} = \frac{2\Delta\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} + \frac{\Delta\mu_1}{\mu_1} + \frac{2\Delta t_1}{t_2 - t_1}. \tag{89}$$

С помощью мостовой схемы можно также определить температурный коэффициент тангенса угла потерь β_2, который рассчитывается по формуле

$$\beta_2 = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1}{\operatorname{tg} \delta_1 (t_2 - t_1)} = \frac{R_{к2} - R_{к1}\left(1 + \frac{L_2 - L_1}{L_1}\right)}{R_{к1}(t_2 - t_1)}, \tag{90}$$

где $R_{к1}$ и $R_{к2}$, L_1 и L_2 — сопротивления потерь и индуктивности обмотки с образцом соответственно при температурах t_1 и t_2;

$$L_2 = L_1 [1 + \beta_1 (t_2 - t_1)]. \qquad (91)$$

Максимальная относительная погрешность температурного коэффициента $\operatorname{tg} \delta_\mu$ подсчитывается по формуле

$$\frac{\Delta\beta_2}{\beta_2} = \frac{2\Delta R_к}{R_{к2} - R_{к1}} + \frac{\Delta R_{к1}}{R_{к1}} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t_1}. \qquad (92)$$

Определение временно́й стабильности проницаемости может осуществляться с помощью мостовых схем, позволяющих оценивать изменения индуктивности до 0,1%.

Во избежание влияния внешней температуры вся установка должна быть термостатирована.

Влагостойкость магнитных материалов может быть оценена по относительному изменению проницаемости или тангенса угла потерь после увлажнения испытуемого образца.

За счет большего изменения собственной емкости увлажненного образца по сравнению с сухим при нагреве от температуры t_1 до t_2 происходит кажущееся увеличение температурного коэффициента проницаемости. Критерием влагостойкости при этом может служить отношение $\beta_{1с}$ сухого образца к $\beta_{1у}$ увлажненного образца, т. е.

$$k_в = \frac{\beta_{1с}}{\beta_{1у}}. \qquad (93)$$

Определение влагостойкости магнитодиэлектрических сердечников на основе карбонильного железа указанным методом показало, что при использовании в качестве предварительной изоляции ферромагнитных частиц жидкого стекла коэффициент влагостойкости $k_в$ будет равен 0,1. Применение фосфатированных порошков карбонильного железа повысило $k_в$ до 0,5.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 19 коп.